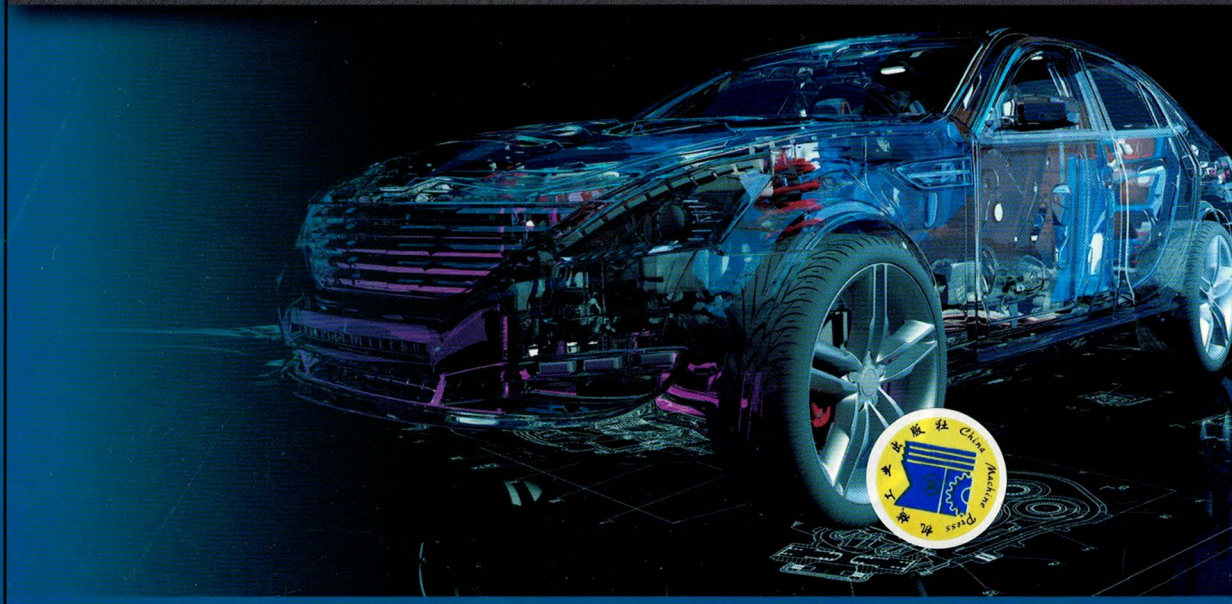
普通高等教育汽车工程类专业规划教材

汽车设计与开发集成

◎ 王秋成　编著

Automobile Design & Development Integration



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

王秋成，1964年出生，籍贯绍兴，博士、教授、博士生导师。现任浙江工业大学车辆工程研究所所长，Active Member of SAE International, 中国汽车工程学会（SAE-China）汽车制造分会委员会委员，浙江省新能源汽车产业联盟专家委员会委员。

普通高等教育汽车工程类专业规划教材

汽车设计与开发集成

Automobile Design & Development Integration

王秋成　编　著

机 械 工 业 出 版 社

本书分整车开发流程与管理、整车性能开发与评估、整车性能试验与验证三个部分：第1部分介绍了整车开发概述、新车型开发战略、新车型开发流程、汽车造型设计、虚拟样车流程、汽车电子电器系统架构等，第2部分以满足法律法规与消费者需求为前提，探讨了汽车动力与操控性、主（被）动安全性、车舱舒适性、防盗性、车载信息娱乐系统等整车性能开发与评估方法，第3部分阐述了整车性能试验规范与验证体系、新车排放试验与可靠性试验及其评估方法。本书涉及面广，可作为车辆工程专业的研究生和本科生教材，使汽车行业的技术开发与管理人员更好地理解整车开发的流程及其管理，了解不同开发目标之间的冲突与解决方法，以及不同学科和文化背景汽车开发人员之间的相互沟通与交流，认识到汽车行业技术进步是人类文明和社会可持续发展的强大动力。

图书在版编目（CIP）数据

汽车设计与开发集成/王秋成编著. —北京：机械工业出版社，2018.6
普通高等教育汽车工程类专业规划教材
ISBN 978-7-111-59916-6

Ⅰ.①汽… Ⅱ.①王… Ⅲ.①汽车－设计－高等学校－教材 Ⅳ.①U462

中国版本图书馆CIP数据核字（2018）第097660号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）
策划编辑：丁 锋 责任编辑：丁 锋
责任校对：郑 婕 封面设计：张 静
责任印制：张 博
三河市宏达印刷有限公司印刷
2018年7月第1版第1次印刷
184mm×260mm·14.75印张·356千字

0001—3000册
标准书号：ISBN 978-7-111-59916-6
定价：59.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务	网络服务
服务咨询热线：010-88379833	机 工 官 网：www.cmpbook.com
读者购书热线：010-88379649	机 工 官 博：weibo.com/cmp1952
	教育服务网：www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版	金 书 网：www.golden-book.com

前　言　Foreword

当今全球范围的交通拥堵与环境污染对于汽车工业的影响，使人们的注意力不仅聚焦于市场上销售的汽车，还关注于汽车是如何研发的。整车制造商不断开发新车型，汽车零部件供应商也通过供货深入集成到整车开发流程中，而市场分析师则评估汽车行业的投资机会和未来前景。因此，全面地理解汽车设计与开发流程是不可或缺的，这也是本书的核心内容。

让我们面对这样一个现实：1888 年卡尔·奔驰、威廉·迈巴赫、戈特利布·戴姆勒等发明第一辆汽车之后，近 130 年来，乘用车的整体概念并没有发生多大的改变。虽然汽车零部件自那时起已经被大大优化，但是 21 世纪的汽车还是由内燃机通过变速器、传动轴和车轮将驱动力传递到路面，由弹簧减振单元来保证行驶稳定性和乘坐舒适性。车辆还是由转向盘转动前轮来转向，所需的控制单元还是被安装在驾驶人前的仪表板上。

然而，汽车开发流程却发生了戏剧性的变化。当初，只要一个杰出工程师工作几年就可完成的工作，如今已经被来自许多学科的汽车开发人员及其高度交错的合作网络所替代。汽车开发流程已经成为非常复杂、分散而又相互作用的子进程，这些子进程以非常复杂的状态快速运行着。但目前还缺乏一个完整而详细的汽车开发过程模型，尽管这一直是汽车开发技术人员多年以来的梦想。一方面，假如确实有这样一个模型，在它诞生时就可能会过时；另一方面，在操作层面上，真正的车辆开发在某种程度上依赖于个人经验、偏好和现实需求，而不是根据一丝不苟的详细计划。而且世界上许多著名品牌的整车制造商，其开发流程也各有特点。毕竟，汽车研发过程主要与人有关。

这主要有两方面的挑战，一是技术层面要整合分离的汽车零部件成为一辆完整的汽车，二是同时要协调几千个来自不同公司、专业、文化和社会背景的人之间的相互合作，这使得汽车开发充满挑战，又令人着迷。本书主要关注两个课题：第一点，顾客是当今买方市场的“上帝”，将满足顾客对整车特性的需求放在首位；第二点，是与设计人员相关的，他们的个人目标、思维方式及其相互关系。希望本书能反映和总结作者和来自世界各地汽车专家的交流成果以及本人 30 多年来在新产品开发领域的专业知识与经验积累。

本书与其说是一本有关汽车开发的专业书籍，还不如说是一本涉及面很广的教科书，使读者沉浸在汽车开发流程的知识海洋中，体验从新车概念到样车试验，从新产品开发战略到汽车功能开发的整合，从汽车电子/电气架构到车载信息娱乐系统开发的过程。作者著书是为了让读者熟悉当今在汽车开发流程中的技术范畴与目标冲突解决方案，而不是深入研讨其技术细节。例如，对于一个汽车主动安全开发人员，从汽车安全性开发的章节可能只反映出他的专业知识，但是通过阅读其他章节，他可以更深入了解汽车开发流程，以及汽车电子/电气和嵌入式软件等开发人员对汽车主动安全的推动作用，进而更好地理解其在整车开发流程中的作用。

同其他汽车设计与开发专业书籍和教材相比，本书更多地侧重于整车开发流程与管理，同时强调汽车开发人员在整车开发过程中如何满足法律法规与消费者的需求。在汽车开发中，作者坚信顾客对整车特性的要求将主导新车概念开发。只要汽车动力与操控性、主（被）动安全性、车舱舒适性、防盗性、车载信息娱乐系统等性能满足顾客的要求，底盘开发等技术问题就迎刃而解了。

作者希望本书能帮助车辆专业的研究生、本科生，汽车行业的技术与管理人员，广大汽车爱好者能够更好地理解整车开发的流程，认识到技术进步和人类文明之间的关系、不同开发目标之间的冲突，以及开发人员之间的相互沟通和依赖关系。希望能和大家分享作者充满挑战与令人着迷的整车开发流程。

最后，感谢浙江工业大学重点教材建设基金、专著与研究生教材出版基金的资助。感谢吉利汽车研究院朱凌博士对本书进行了仔细审阅，并提出了许多宝贵意见。在 8 年写作过程中，作者指导的研究生陈奇、马骏、斜李昕、陈蕴弛、何婷婷、魏瑞晖、卢文跃、邴源、王云涛、刘顺、郑叶枭、黄子俊等在不同时期参加了一些章节的文档整理与编辑工作，柳政卿博士详细校对与审核了整书样稿。

由于本书涉及面广，篇幅较长，加之作者水平有限，疏漏和不足之处难免，诚望专家、读者批评指正。

王秋成

2018 年于杭州

目　录　Contents

前　言

第1部分　整车开发流程与管理

第1章　整车开发概述 …… 2
1.1　整车开发的范畴 …… 2
1.1.1　整车开发层次 …… 2
1.1.2　整车开发内容 …… 3
1.1.3　创新层次 …… 3
1.1.4　选配及国别版本 …… 3
1.2　开发平台和车型系列 …… 4
1.2.1　新车型开发系列 …… 4
1.2.2　整车开发平台架构 …… 5
1.2.3　典型汽车企业平台架构 …… 6
1.2.4　共享开发平台的局限性 …… 8
1.3　新产品开发流程 …… 8
1.3.1　新车型开发阶段划分 …… 9
1.3.2　新车型开发流程 …… 10
1.3.3　新车型开发流程图 …… 11
1.4　汽车开发项目管理 …… 11
1.5　全球合作开发项目 …… 12
第2章　新车型开发战略 …… 14
2.1　概述 …… 14
2.2　新车型开发成败案例 …… 15
2.2.1　成功车型 …… 15
2.2.2　失败车型 …… 17
2.3　新车型开发成功的先决条件 …… 18
2.3.1　全球化的市场布局 …… 18
2.3.2　完整的产品系列 …… 19
2.3.3　良好的品牌形象 …… 21
2.3.4　清晰的产品定位 …… 22

第 3 章　新车型开发流程 …… 24
3.1　方案策划阶段 …… 24
3.1.1　技术可行性 …… 24
3.1.2　经济可行性 …… 25
3.2　概念设计阶段 …… 27
3.2.1　新车型概念设计 …… 27
3.2.2　整体布置草图 …… 28
3.2.3　整车造型设计 …… 28
3.2.4　新车型项目概念书 …… 28
3.3　系列车型开发 …… 29
3.3.1　工程设计阶段 …… 29
3.3.2　零部件产品发布 …… 31
3.3.3　整车集成阶段 …… 31
3.3.4　样车试制阶段 …… 32
3.3.5　投产准备阶段 …… 33
3.4　后续开发和产品改进 …… 34
第 4 章　汽车造型设计 …… 35
4.1　汽车造型设计要求 …… 35
4.1.1　造型风格独特 …… 36
4.1.2　体现人机工程学 …… 39
4.1.3　风阻系数小 …… 40
4.1.4　实用性强 …… 42
4.2　汽车车身造型设计 …… 43
4.2.1　前卫设计阶段 …… 43
4.2.2　概念设计阶段 …… 43
4.2.3　技术设计阶段 …… 45
4.3　汽车内饰设计 …… 46
4.3.1　汽车内饰造型风格 …… 46
4.3.2　汽车内饰设计内容 …… 46
4.3.3　汽车内饰色彩与纹理设计 …… 47
4.4　汽车造型设计验证 …… 47
4.4.1　造型风格验证 …… 48
4.4.2　人机工程学验证 …… 48
4.4.3　储物实用性评估 …… 49
第 5 章　虚拟样车流程 …… 50
5.1　虚拟样车建模 …… 50
5.1.1　虚拟样车技术简介 …… 50

5.1.2　虚拟样车信息技术系统平台 …… 50
5.1.3　车型技术参数 …… 51
5.1.4　零件 CAD 建模 …… 52
5.2　整车几何集成 …… 52
5.2.1　空间干涉检测 …… 53
5.2.2　功能间隙检查 …… 54
5.3　深层次功能几何评估 …… 55
5.3.1　行李箱储物空间 …… 55
5.3.2　车辆运动学评估 …… 55
5.4　虚拟样车模型版本 …… 56
第 6 章　汽车电子电器系统架构 …… 58
6.1　概述 …… 58
6.2　系统开发管理 …… 60
6.2.1　文化冲突 …… 60
6.2.2　系统开发管理 …… 61
6.3　顾客需求挖掘 …… 61
6.3.1　需求启发 …… 61
6.3.2　需求分析 …… 62
6.3.3　需求表达 …… 62
6.4　汽车 E-E 系统构架 …… 63
6.4.1　逻辑系统构架 …… 63
6.4.2　技术系统构架 …… 63
6.5　汽车 E-E 系统设计与开发 …… 66
6.5.1　软硬件组成 …… 66
6.5.2　应用软件开发 …… 67
6.5.3　系统模块测试 …… 67
6.6　汽车 E-E 系统集成和验证 …… 68
6.6.1　汽车 E-E 子系统集成 …… 68
6.6.2　整车 E-E 系统集成 …… 69
6.7　系统配套管理 …… 69
6.7.1　配置管理 …… 70
6.7.2　风险管理 …… 70
6.8　能力成熟度模型集成 …… 71
6.8.1　组织成熟度等级 …… 72
6.8.2　过程能力等级 …… 73
第 7 章　整车开发流程管理 …… 74
7.1　可注册性 …… 74

7.1.1 全球机动车法律法规的历史变迁 …… 74
7.1.2 新车型认证技术规范 …… 75
7.1.3 各国新车注册认证相关法律法规 …… 77
7.2 目标管理 …… 80
7.2.1 开发目标 …… 80
7.2.2 目标协议 …… 82
7.2.3 签发流程 …… 83
7.3 设计问题管理 …… 84
7.4 签发与变更管理 …… 86
7.4.1 产品签发 …… 86
7.4.2 设计变更 …… 87
7.4.3 工程变更管理 …… 88
7.5 质量管理 …… 89
7.5.1 质量定义 …… 89
7.5.2 产品交付前（内部）质量评估 …… 90
7.5.3 产品交付后（外部）质量评估 …… 91
7.5.4 全面质量管理体系 …… 93
7.5.5 质量成本 …… 95

第 2 部分 整车性能开发与评估

第 8 章 汽车动力系统设计 …… 98
8.1 汽车动力系统分类 …… 98
8.1.1 传统发动机节能降耗 …… 98
8.1.2 生物燃料动力系统 …… 99
8.1.3 可再生能源动力系统 …… 99
8.2 传统汽车动力系统设计 …… 100
8.2.1 汽车发动机节能降耗设计 …… 100
8.2.2 动力传动与变速器设计 …… 101
8.2.3 四轮驱动装置设计 …… 102
8.3 新能源汽车动力系统设计 …… 103
8.3.1 氢燃料汽车动力系统 …… 103
8.3.2 混合动力汽车动力系统 …… 105
8.3.3 纯电动汽车动力系统 …… 106
8.3.4 燃料电池汽车动力系统 …… 109
8.4 汽车动力性能试验与验证 …… 111
第 9 章 汽车操控性设计 …… 113
9.1 概述 …… 113

9.1.1　纵向动力学 …… 113
9.1.2　侧向动力学 …… 114
9.1.3　垂向动力学 …… 115
9.2　汽车转向系统设计 …… 115
9.2.1　转向系统设计要求 …… 115
9.2.2　液压助力转向机构设计 …… 116
9.2.3　线控转向机构设计 …… 116
9.3　汽车底盘系统设计 …… 117
9.3.1　悬架系统设计 …… 118
9.3.2　车轮总成设计 …… 119
9.3.3　制动装置设计 …… 120
9.3.4　四轮驱动装置设计 …… 121
9.4　操控性试验与验证 …… 122
第 10 章　车舱舒适性设计 …… 124
10.1　概述 …… 124
10.1.1　车舱舒适性的客户需求 …… 124
10.1.2　车舱舒适性评价标准 …… 124
10.2　行驶平顺性设计 …… 125
10.2.1　相关法规和客户需求 …… 125
10.2.2　行驶平顺性设计 …… 126
10.2.3　行驶平顺性验证 …… 128
10.3　声学舒适性设计 …… 129
10.3.1　相关法规和客户需求 …… 129
10.3.2　声学舒适性设计方法 …… 129
10.3.3　声学舒适性试验与验证 …… 131
10.4　热舒适性设计 …… 133
10.4.1　相关法规和客户需求 …… 133
10.4.2　车舱热舒适性设计方法 …… 133
10.4.3　热舒适性验证 …… 134
10.5　新车价值感知与体验 …… 136
10.5.1　新车价值顾客体验 …… 136
10.5.2　新车价值品位提升 …… 136
10.5.3　新车价值体验与验证 …… 137
第 11 章　汽车驾驶安全性设计 …… 138
11.1　概述 …… 138
11.1.1　汽车安全性概述 …… 138
11.1.2　汽车安全性分类 …… 139

11.1.3 汽车安全性影响因素分析 …… 140
11.2 汽车安全性技术法规和标准 …… 140
11.2.1 新车被动安全性强制性评估 …… 141
11.2.2 新车被动安全性非强制性评估 …… 141
11.3 汽车主动安全性设计 …… 144
11.3.1 汽车主动安全性技术法规与标准 …… 144
11.3.2 汽车主动安全性设计方法 …… 145
11.4 汽车被动安全性设计 …… 148
11.4.1 采用（超）高强度材料 …… 148
11.4.2 安全带与安全气囊 …… 149
11.4.3 车身耐撞性设计 …… 150
11.4.4 车门防撞强化设计 …… 151
11.4.5 转向系统与内饰件 …… 151
11.5 汽车安全性评估与验证 …… 152
11.5.1 汽车碰撞模拟仿真 …… 152
11.5.2 假人碰撞试验 …… 153
11.5.3 主动安全性评价 …… 156
11.5.4 事故损伤医学鉴定 …… 158
第 12 章 汽车防盗性设计 …… 160
12.1 相关法规与设计要求 …… 160
12.1.1 汽车防盗性分类 …… 160
12.1.2 汽车防盗性的法律法规 …… 162
12.1.3 新车防盗安全性评级 …… 162
12.2 汽车防盗系统设计 …… 163
12.2.1 防止非法移动车辆 …… 164
12.2.2 防止入车偷窃 …… 164
12.2.3 防止非法驾驶车辆 …… 165
12.2.4 降低被盗件使用价值 …… 165
12.2.5 降低汽车被盗风险 …… 166
12.3 汽车防盗系统测试与评估 …… 166
第 13 章 车载信息娱乐系统设计 …… 167
13.1 概述 …… 167
13.1.1 系统功能与客户需求 …… 167
13.1.2 当前研究与发展现状 …… 168
13.2 车载网络系统架构设计 …… 170
13.2.1 车载网络结构模块 …… 171
13.2.2 车载网络总线分类 …… 172

13.3　车载信息娱乐系统架构设计 …… 173
13.3.1　操作系统 …… 173
13.3.2　CPU（ARM）处理器 …… 174
13.3.3　存储显示与接口模块 …… 175
13.3.4　通信模块 …… 177
13.4　车载信息娱乐硬件系统测试与验证 …… 180
13.4.1　驾驶室“中控台”设计与实现 …… 180
13.4.2　车载信息娱乐系统测试与验证 …… 181

第3部分　整车性能试验与验证

第14章　整车性能试验与体系 …… 184
14.1　整车性能试验简介 …… 184
14.1.1　整车性能试验方式 …… 184
14.1.2　整车开发各阶段的试验验证 …… 184
14.2　整车试验规范与验证体系 …… 186
14.2.1　整车试验规范的确定 …… 186
14.2.2　整车试验项目类型 …… 187
14.2.3　试验规范的分解与传递 …… 187
14.3　整车试验项目清单 …… 188
第15章　新车排放试验与验证 …… 194
15.1　概述 …… 194
15.2　新车尾气排放和能耗测试 …… 195
15.2.1　相关法规要求 …… 195
15.2.2　尾气排放和能耗测试方法 …… 199
15.3　汽车挥发性排放物测定 …… 201
15.3.1　相关法规要求 …… 201
15.3.2　挥发性排放物分类 …… 202
15.3.3　挥发性排放物测量与评估方法 …… 203
15.4　汽车降噪设计 …… 204
15.4.1　相关法规及客户要求 …… 204
15.4.2　降噪设计措施 …… 204
15.4.3　噪声测试方法与标准 …… 205
15.5　汽车抗电磁辐射设计 …… 205
15.5.1　相关法规要求 …… 205
15.5.2　抗电磁辐射设计措施 …… 206
15.5.3　测试方法与标准 …… 206

第 16 章 新车可靠性试验与验证 …… 207
16.1 概述 …… 207
16.1.1 可靠性定义 …… 207
16.1.2 失效严重性 …… 208
16.1.3 可靠性与质量 …… 208
16.1.4 可靠性与成本 …… 209
16.2 汽车失效模式分析 …… 209
16.2.1 汽车零部件失效 …… 209
16.2.2 汽车电子器件失效 …… 211
16.2.3 嵌入式软件失效 …… 211
16.3 整车系统可靠性设计 …… 212
16.3.1 汽车可靠性风险评估 …… 213
16.3.2 抗电磁干扰性能 …… 215
16.4 汽车可靠性试验与评估 …… 217
16.4.1 加速寿命试验 …… 217
16.4.2 可靠性模拟仿真 …… 218
16.4.3 整车可靠性试验 …… 219
16.4.4 非营利机构评估 …… 220
参考文献 …… 222

第1部分

整车开发流程与管理

第1章

整车开发概述

1.1 整车开发的范畴

车辆的产业化开发通常是以项目的形式进行组织的。这些车辆开发项目根据其技术内容、资金和持续时间的不同，存在很大差异。驱动车辆开发的主要因素包含：

- 设计层次；
- 设计内容；
- 创新层次；
- 可供选配项。

1.1.1 整车开发层次

一个车辆开发项目的设计层次描绘了项目从何时开始及其相应的设计工作内容。将所需设计工作内容按从高到低的顺序进行排列，设计层次通常可分为：

- 整车重新设计（Complete redesign）：从零开始，白手起家，包括从车辆概念到零部件的全新设计，而标准件和已有车型零件仅用在不可见的部位。根据汽车行业的行规，一款车型的生命周期是七年，因此一般每七年就对车型进行重新设计。重新设计需要重新规划、设计和测试，所以开发工作量最大，也是最耗费资金的车型阶段。

- 衍生设计（Derivative design）：基于现有开发平台和系统构架，再设计一款车型。这种衍生车型一般与基础车型共享开发系统和零件，以便最大限度地降低开发和生产成本，但不可轻易让消费者一眼就看出衍生车型与基础车型的共同点。

- 改款设计（Variant design）：与衍生车型相比，改款车型显然可组成一个车型系列（图 1-1 改款的宝马 3 系）。通常，改款车型包括两厢轿车（coupe）、旅行车（wagon）或者敞篷车（convertible）等形式，这些改款车型的车身均源自于其基础车型，即传统三厢轿车（sedan）。改款车型的开发平台和系统架构，包括车身与内外饰零件，均沿用其基础车型。早在基础车型设计阶段，就已经将后续车型规划在相应的车型系列中了（见 1.2.1 节）。

- 车型升级（Model updates）：指传统车辆七年设计寿命周期后期，对车型进行较小的设计变更以提升车型的售价（即零售价）。通常设计变更包括汽车外饰件、内饰件、新色彩造型和选配项。在尽可能低的开发成本下，更新车辆外观来提升消费者吸引力。

- 车型年（A model year）：车型年是指因成本或质量需要进行车辆设计变更，通常是在投产后数年内，通过收集顾客、经销商等方面的信息，不断进行设计变更，然后在旺季生产停工后，把设计变更导入汽车生产过程中，尽量减少对原有车型大批量生产的影响。如设计变更所需，还可能变更相应的汽车生产设备及生产线。

1.1.2　整车开发内容

设计内容是决定整车开发流程复杂程度的另一个因素。一款新车型提供给消费者越多复杂的功能，开发人员就需要在车辆设计、评估和验证过程中付出越多的努力。相对于基础车型，通常设计内容指标包括：

- 汽车零部件的数量；
- 电子控制单元的数量；
- 汽车软件代码的行数。

1.1.3　创新层次

随着技术创新成为汽车吸引潜在消费者的一个主要因素，汽车设计开发过程越来越复杂，尤其是整车及零部件测试方面。由于缺乏可借鉴的经验积累，需要进行广泛的系统评估。在开发过程中，可以预见大量的需要妥善解决设计问题。

以宝马 5 系的车身前部结构为例。在早期宝马 5 系车型中，车身前部是碳素钢结构设计，通过点焊的方法将不同规格的钢板冲压件焊接成为一体。这是一种传统的焊接工艺，已有比较完善的焊接强度、耐蚀性、耐撞性和老化特性等性能数据可查，可参考行业标准程序来评估相关设计。而新款的宝马 5 系前车身结构，是由碳素钢、铝合金、铸件和塑料件构成的，并采用点焊、激光焊接、胶接和铆接等多种联结工艺。但是这种极富创新的工艺解决方案，需要做大量且非常昂贵的测试验证，以确保整车在各种可能工况下的驾驶安全性和实用性，以及全生命周期的疲劳耐久性。

1.1.4　选配及国别版本

由于驾驶人员的多样性与复杂性，对车辆的测试验证工作，应与车辆提供的可选配置相对应。高端品牌通常提供非常多的功能配置，以便客户能够完全根据自身的需求来选择功能配置。虽然增加新车型的不同功能配置有助于提升客户满意度，并促成客户购买，但是相应测试工作量按照指数曲线倍增。以 2009 款新宝马 7 系为例，除了 12 种车身外观色彩和 12 种内饰颜色，更有超过 200 种不同的功能配置，可供客户选择和组合。理论上这将呈现多达 3.5×10^{30} 种可能的新车功能配置组合，而每种组合都需几何评估和功能评估，以确保 100% 可靠性。

为了减少测试验证工作的复杂性，首选方法是捆绑组合。例如，立体声音响系统可配置（无、低、高）三种层次，同时导航系统也可以选择相应的三种配置，因而将会有 9 种不同的功能配置组合。然而实际情况中，选用高保真音响而不选配导航仪，或者选用高档导航仪却不配立体声音响的概率是很低的。因此仅提供三种立体声/导航仪的捆绑组合（无/无、低/低、高/高），也是合理的：从而可减少其他六种组合的评估工作量。

其次，一些日本的整车制造商（OEM）倡导，只评估顾客最普遍的 20% 功能配置组合，这通常就能满足 95% 的新车订单。如果少数客户选择了一个稀有的功能配置，这将延迟此车的交付日期，因为这种稀有配置是在订单生效后，才开始新车的开发工作。

根据帕累托（Pareto）法则，各种独立组合的评估将使总工作量大幅下降。但是对于少数选择了小众化车辆配置的客户，由于制造商接到订单后车辆的评估工作才开始，车辆交付

期将会很长。

除了功能配置，不同的市场法规也使得同一车型出现特定的国别版本。车辆所允许的排放水平、碰撞标准和安全特性等，在欧洲、美国和日本等国家和地区会有很大区别。采用右舵驾驶的国别版本设计修改工作量很大，如在英国、南非和日本等强制规定需要换用右舵转向盘，这也同时引发如车身、底盘、转向盘、仪表板、内饰、线束等很多零部件的更改。因此，整车制造商在国际上通常提供三种版本的基础车型：欧版、美版和右舵版本。

1.2 开发平台和车型系列

成本是决定产品竞争优势的重要因素之一，对于市场竞争日趋激烈的汽车产业来说，极度追求规模效应的目的也在于此。为了充分发挥大规模制造带来的成本节约优势，平台化模式在汽车行业率先得到了应用，而产品的平台化制造则以产品的平台化设计开发为基础。为此，企业深度理解并有效实施产品平台化开发战略将直接决定后续成本控制的可能空间，并带来其他方面的诸多益处，具有重要的意义。

一个快速且低成本地开发新车型的现有途径，是在多种不同车型和开发平台中实现总成部件通用化。不同车型、车型系列、商标，甚至在不同整车厂之间共享标准模块，如电子零部件、底盘系统或发动机，这有利于：

- 减少汽车部件设计和检测所需的成本与时间；
- 减少工装和装备需求，包括减少在设计、制造、运输和维护中所需的成本与时间；
- 通过采用成熟和著名品牌的总成部件，提高汽车的质量。

标准模块主要应用在车辆的内部不可视区域。两种实现总成部件共享的常用策略是开发平台和车型系列。

平台化的核心在于实现不同产品间零部件的通用。早在 20 世纪 80 年代，一些跨国汽车企业就提出了汽车产品平台的理念，强调在同一平台内应用一些固定的零部件组合，同平台的不同车型之间具有相似的结构与配置，从而为产品的设计开发与生产制造带来了很大的便利。与传统开发模式相比，平台化模式具有节约开发成本、分摊制造和采购成本、产品衍生能力强、新品开发时间短、质量更易保障等优势。同时，通过实施平台化开发战略，企业可以将资源集中于汽车平台的设计开发，即以高水准的平台确保后续衍生车型产品的高水准落地。

平台化的内涵在实践中不断成熟和变化，近年来由大众汽车公司率先提出的模块化理念就是平台化思想的最新发展和突出代表。当前，新一轮科技革命正在引领全球制造业向充分网联协作的“智能制造”转型，而“智能制造”的指向就是“大规模 + 定制化”。在这一前景下，更为灵活的各个模块，将通过充分网联实现规模化制造并组装成为各种产品，使兼顾产品成本与消费者个性化需求成为可能。也就是说，模块化的产品开发模式恰与未来产业演进方向一致，急需重点关注和深入研究。

1.2.1 新车型开发系列

虽然共享同一平台制造开发的车辆共性不应该一目了然，但是由于同属于同一车型系列且共享外饰和内饰件，使得这些车型不但在技术上，而且在视觉上给人以同一系列的感觉。

例如，在宝马 3 系车型不同衍生车型可看到这种相似性（图 1-1）。

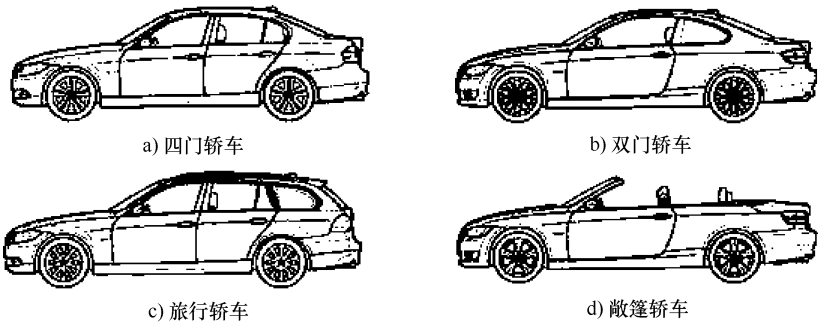


图 1-1　宝马 3 系车型（来源：宝马）

在过去，车型系列是先独立设计出一辆基础车型，再衍生出其他车型来创建的。在衍生车型设计中，那些已经被认可作为共享部件，后来经常不得不被更换掉，违背了节省开发费用的本意。然而，只有预先规划安排好这条车型系列的所有车型以及共享的零部件时，才能预测该车型系列的经济效益潜力。基于这种开发方式，在推出首款开发车型之前，各个开发部门必须对属于该车型系列的全部开发车型预先取得共识。例如，与基础三厢轿车车型共享底盘车架的两厢轿车、旅行车、敞篷轿车、四轮驱动车等必须提前完成设计并充分证明其可行性，尽管这些衍生车可能在基础车型量产数年之后才投产。同样，必须规划相配套的投产计划（在什么工厂生产什么车型）。

1.2.2　整车开发平台架构

基于对诸多企业平台化、模块化实践的深入研究，经学术分析提炼，本书理清了相关主要概念的本质及内在逻辑关系，提出了汽车制造业范畴内平台及模块等概念群组的定义。

1）平台。在汽车制造业中，平台指的是由若干通用部件组合而成的一种载体，在这一载体上开发出的不同产品会使用这些通用部件。

2）模块。在汽车制造业中，模块指的是基于平台原理，从整车结构角度拆分出的、具有某种特定结构和功能的通用部件的组合。可以说，模块和总成、系统等概念有相近之处，但模块更强调独立性、继承性和通用性。在本书的定义体系下，模块是整车产品中高于系统和总成的特定零部件组合。

3）产品平台。即用于开发系列化产品的平台。对于汽车制造业而言，传统意义上的平台概念就是指产品平台，通常，同一产品平台的车型产品往往拥有相同或相似的动力总成系统和底盘系统。

4）架构平台。指的是由若干可通用和组合的共性模块组成的平台，也就是使用各种通用模块组合的多个不同产品平台的载体。架构平台也可称为模块化平台，这是模块化开发模式产生后随之衍生的“新”内涵，也是平台和模块概念易于混淆之处。从这个定义出发，不难理解，架构平台是连接产品平台与模块的纽带，这也正是当前大众、丰田等国际汽车企业致力于打造并完善的平台类型。

而相应的，“平台化”是基于平台理念进行产品开发的方法，“模块化”则是基于模块理念进行产品开发的方法。除此之外，还有“系列化”“通用化”“标准化”等产品设计开

发方法。这“五化”对应整车产品的不同层级，但同为提升汽车大规模制造中零部件共享程度的重要手段，其核心指向都是尽可能地实现“通用”，具体组合关系见图 1-2。

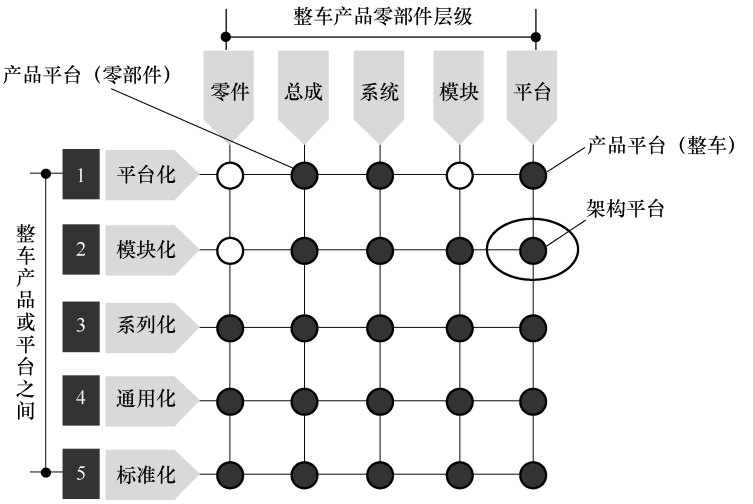


图 1-2　整车产品不同层级的对应关系

由图 1-2 可知：对于单个零件，是无所谓平台化或模块化的，主要通过系列化、通用化和标准化的设计手段实现在不同总成间的充分通用，如为螺钉、螺母等制定统一的标准；对于总成及系统而言，可以进行平台化或模块化的开发，总成的平台化开发实际上就是打造零部件的产品平台，如发动机平台；平台化的总成及系统就构成了整车级别的产品平台，如大众的 PQ 系列平台、丰田的 B 平台等；模块化设计的总成及系统就是模块，进而构成整车架构平台，如大众的 MQB 平台。

开发平台是为了实现众多不同车型共享总成部件，这些车型也可能属于不同的汽车品牌。其目的是在开发平台上尽可能地共享零部件时，最大限度地开发更多千差万别的新车型。许多特殊车型，如敞篷跑车和运动型多功能车（SUV），若不与其他车辆共享现有车辆架构，是不会产生经济效益的。

1.2.3　典型汽车企业平台架构

1. 大众汽车公司

大众汽车是模块化架构平台的鼻祖，这与其全球年销量近千万辆的规模密切相关。大众模块化平台的代表是发动机横置模块化（Modularer Querbaukasten，MQB）平台，其目标是整合原有的产品平台——PQ2、PQ3 及 PQ4 系列平台，从而形成一个全新的扩展性更强的统一平台。这是一个宏大的替换目标，可以说 MQB 平台是目前最接近理想化的架构平台。MQB 平台以通用机舱为基础与核心，通过大量系列化的可组合的模块与子模块构成不同的产品平台，除了前轴与前围板距离不变，其他尺寸如轴距、前悬和后悬等都可调整，甚至轮距也允许变化，具有超大柔性和超强灵活性。鉴于大众集团旗下品牌众多，MQB 平台理论上可以承载几十款不同品牌和市场定位的车型产品的规划。大众希望在 MQB 平台上衍生出的车型实现 80% ~85% 的零部件通用，从而极大地节约产品开发时间和费用、降低零部件采购和质量管控成本。

当今，德国大众的高尔夫开发平台可能是持续时间最长的共享开发平台：共有 4 个不同品牌、13 种不同车型共享此开发平台，包括绝大多数动力总成、转向系统、悬架、车架及内饰件（图 1-3）。而众多开发车型的差别仅在于外观车身造型和一些内外饰，为客户定制的仅仅是将开发平台连接到特定车型车身的接合面零件，有些零件的差异化仅仅是（转向盘盖板上）汽车品牌标识不同而已。

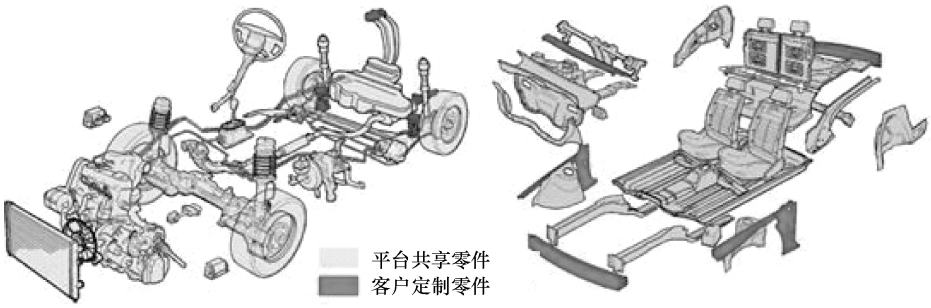


图 1-3　大众集团高尔夫开发平台 PQ34（来源：大众集团）

2. 丰田汽车公司

在大众推行模块化平台战略之后，丰田也提出了自己新的平台战略，其核心就是丰田新全球架构（Toyota New Global Architecture，TNGA）平台，是对 NBC、B、K、N 四大平台的整合，将新的架构平台重新分为混动、前驱、后驱三大类产品平台。同大众的目标相似，丰田也计划利用 TNGA 平台进一步扩大零部件共享、缩短车型研发和生产周期，从而降低成本。不过与大众 MQB 平台只是原来横置产品平台的整合不同，TNGA 平台据称将囊括横置和纵置的产品平台，理论上平台柔性更高。

从表面上看，丰田的方案较大众更为激进，但丰田的 TNGA 平台实际上通过架构平台内的模块共享实现零部件的通用，通过架构平台衍生的不同产品平台来实现前驱、后驱甚至混动系统的柔性化组合。从已知信息来看，TNGA 平台更多的是在基于现有产品平台的通用化整合上做了大量优化设计工作。此外，丰田对 TNGA 平台制定的 80% 的通用化目标同样面临巨大挑战，在现有技术水平和全球布局模式下，难度可想而知。

3. 日产汽车公司

日产的通用模块化谱系（Common Module Family，CMF）平台同样也是一种架构平台的理念。CMF 平台由 4 个基本模块组成，包括发动机舱、乘员舱、前部底盘和后部底盘模块，此外，还有 1 个电器构架模块。通过这些系列化模块的不同组合，衍生出众多的不同产品，从而可以大幅简化设计、缩短研发及生产所需的时间。

日产规划的架构平台，采用相对较少的模块是其突出特点，模块的性能和可靠性更容易得到保证。同时，各模块并非完全固化，而是系列化的，有不同的尺寸，因此也具备灵活组合、衍生不同车型的能力。与大众的模块高度细化的方式相比，日产的模块化平台可以说较为简单，虽然理论上的最大收益小一些，但实现起来也更为容易。

当然，这类相对简单化的模块处理战略，由于不能一步到位规划出具有充分柔性和灵活性的平台，使得衍生车型的尺寸范围和数量受到限制。相对于大众这样的竞争对手，未来可能存在平台成本竞争力不足的危险。必须强调的是，大众、丰田、日产的平台化模块化战略

都不能说是最优的，架构平台策略必须结合企业自身的状况深思熟虑后进行选择。

1.2.4 共享开发平台的局限性

虽然共享整车开发平台有利于节省开发成本和时间，但是它也会对整车特性带来消极的影响。当整车集成评估时，发现从优化车辆驾驶动态特性的角度，需要变换相关的总成部件，但是因为共享总成部件，实际上无法进行相应的变换，势必影响车辆驾驶动态特性的最优化效果。

从整车的观点出发，通过精致地调校各种车型的承重件（如车轴或轮辋）和调校件（如悬架、发动机支架或轮胎），使其具有差异性是更好的解决方案。这种非常复杂的调校方法需要深入洞悉影响整车特性的有关零件及其性能（如车辆操控性、座舱舒适性、被动安全性等，详见第 8 ~ 13 章），但这也是既能优化产品性能又能保持开发流程效率的唯一方法。

1.3 新产品开发流程

新产品开发流程（PEP），也称为产品上市流程，不仅包括产品设计与测试验证，还泛指为产品制造过程的前期准备工作，它是三个汽车核心流程之一。

每个整车制造商为了能够掌控自身的汽车项目，都有它们详细的产品开发过程模型，即有关产品开发的“秘密菜单”。这些流程模型定义相应的时间节点（milestones），并详细描述在各个时间节点应交付的图纸、文本或样品，同时描述了作为整车产业链中产品开发流程参与方的角色和作用。虽然每个产品开发流程有着各自特色（通常是严格保密的），但是其背后却隐藏着一个被整个行业普遍认可的通用车辆开发模式与架构。

为了更透彻地了解产品开发流程模型，我们必须从不同的角度来讨论它。图 1-4 是以时间轴绘制的，我们首先需要从中认清产品开发模型的不同阶段（从产品策略到系列化支持）。从产品开发过程的角度，我们必须区分部件设计过程、集成过程与技术支持过程。在应用“V 模型”产品开发模型时（见 1.3.3 节），我们又要时刻清楚自己是处于系统设计阶段还是集成阶段。

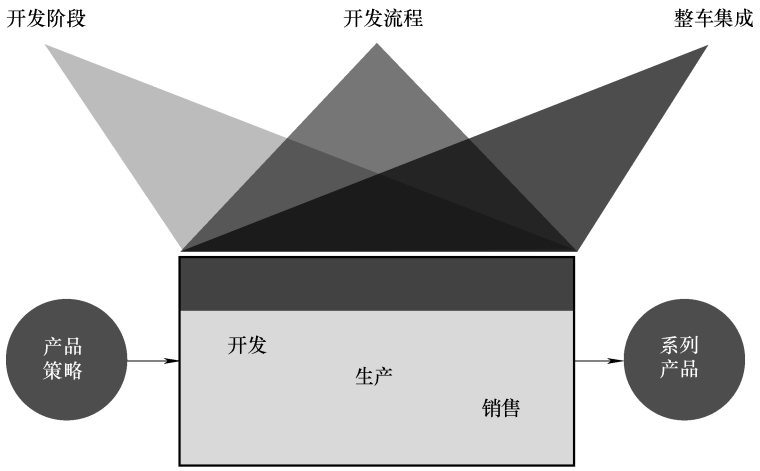


图 1-4 新产品开发流程基本模型

1.3.1　新车型开发阶段划分

新车开发的首要任务是制定产品开发策略，制定应该在何时将何款车型及时推向市场的公司决策。创建与更新产品开发策略是一个长期而持续的过程，从而使得新产品开发项目或开发流程越来越清晰。图 1-4 阐释了产品开发策略作为汽车开发项目的先导作用。

新产品策略着眼于整车，而“预开发”作为另外一项与其平行的连续工程，主要涉及汽车零部件和相关技术（图 1-5）。可见，科研人员将来自于内部或外部研究、供应商、合作伙伴和客户的创意具体化，并评估产品或相关生产流程的技术和经济可行性。而新产品策略将决定首先将哪款车型进行预开发创新。

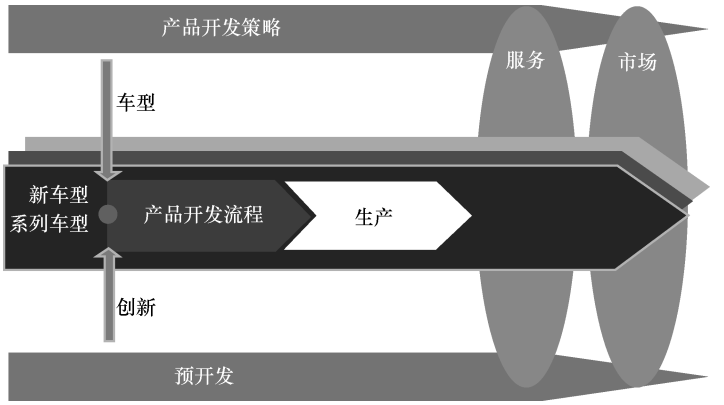


图 1-5　汽车开发项目流程框架图

新产品策略和预开发流程本身都是连续的过程，本书不将其归纳为某个汽车开发项目阶段——虽然它们常常被称为“策略阶段”或“预开发阶段”。在本节中，将对这两个流程进行详细介绍。

虽然不同的整车制造商对产品开发流程的命名方式不同，但通常都将其分为三个阶段，即初始阶段、概念设计阶段和系列化开发阶段。图 1-6 描绘了汽车开发项目过程中相应的代表性时间节点及其目标任务，此外还展示了投产（SOP）以后的第四阶段，即系列化支持和深层开发阶段。本章将详细阐述新产品开发流程的各个阶段。

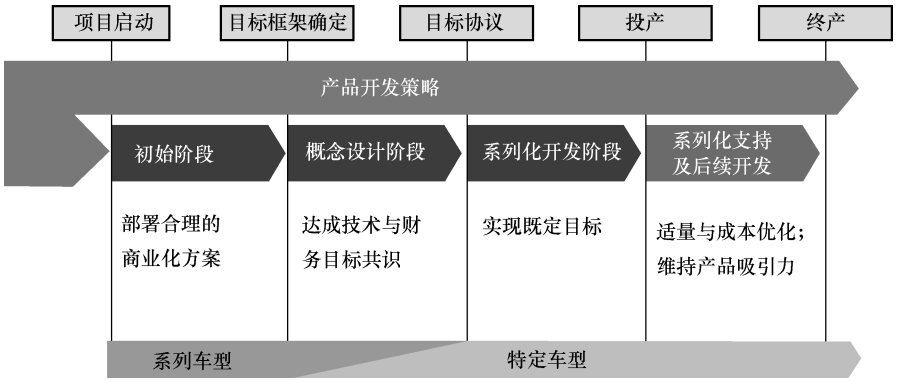


图 1-6　整车开发项目的主要阶段

1.3.2 新车型开发流程

1. 总成部件开发

汽车零部件研发中心（CoCs）也有许多资深的技术专家。例如，在座椅设计中心，我们可以找到负责座椅概念设计、座椅系列化设计、专门负责性能测试以及与座椅供应商协作开发的相关专家。基于这些零部件开发流程，通过定义几何尺寸、选材、编制工艺流程，有关技术要求转换成一系列汽车零部件图纸，最终签发用于批量生产，并与系列车型配套。在产品开发最后阶段工程签发后，汽车零部件设计者将担负起零部件性能满足特定使用需求的个人责任。而在整车开发层面，虽然各个整车制造商有所差异，一般将汽车总成部件设计分成以下六个部分。

1）动力系统设计：发动机、变速器、差速器、驱动轴、传动轴、冷却系统和排气系统。

2）底盘设计：车桥、悬架、转向系统、踏板、车轮和轮胎。

3）车身设计：车身结构（前部、底部、尾部）、外部面板、车门、发动机罩、挡板和油箱盖。

4）外饰设计：前/后保险杠、前/后风窗、车门、装饰件。

5）内饰设计：座舱、装饰件、地毯和座椅。

6）电子/电气系统设计：传感器、执行机构、驾驶辅助系统的线控单元、信息交互系统、信息安全系统等。

从组织机构的角度，工程设计部负责相关新车开发工作时，一般由设计部经理直接向董事会报告工作进展。由于几何设计工作的独立性，大多数整车厂把车身和外饰设计合并在一个部门，当然其他组合也是可能的。

整车制造商一般有一个副总经理专门统筹管理各总成部件设计中心，负责向董事会报告工作进展，例如，在底盘设计部门，可能分别安排负责设计车轴和车轮、制动系统和转向系统等总成部件的符合性认证（CoC）。

2. 整车集成流程

整车集成流程负责定义和开发整车的各种特性。与零部件研发中心的设计师相比，整车集成工程师没有参与设计任何特定的零件，而是评估整车特性目标，并将测试结果和技术建议反馈给各零部件研发中心。因此，整车集成流程引导着各零部件开发过程。整车开发的五大集成流程如下。

1）几何集成：分配和控制车辆所有部件的可用空间。它包含了创建整个车辆内部空间，并将整车内部空间细分给各个总成部件开发中心，通过检查空间干涉和间隙来监控整车几何集成。

2）功能集成：从客户的观点角度出发，如操控性、车舱舒适性和被动安全性等，来验证整车功能特性（见本书第 2 部分）。

3）系统集成：整车电子电气系统的功能集成，包括有关产品开发、生产和服务的需求管理，系统配置与更改管理，以及开发软件的集成。在近些年来，系统集成在整车开发中起到越来越重要的作用，所以将系统集成从功能集成中分离出来单独分类。

4）生产集成：为整车生产及提供相关生产设备与环境而进行的车辆特性验证。

5）服务集成：对汽车服务有关特性的验证，如可维修和可保养性。

3. 相关支持流程

为了能够开发新产品，设计和集成过程中需要额外的支持流程。在项目开发过程中，人力资源部门在恰当的时间和地点提供熟练技能的员工。尤其是项目管理团队的选择，它对项目开发的成败至关重要。财务部门必须提供预算，核查并控制项目开支，确保开发成本的稳定性。采购部门通过分析和议价，选择有良好资质的供应商，来提供汽车零部件和工程服务，形成良好的项目财务。

在整车项目开发中，一个非常重要，但常被低估的，是内部沟通与交流环节。它不仅需要将一些开发信息，也需要将内部新闻或成功的案例，提供给所有项目团队成员。内部沟通与交流有助于形成真正的团队精神，从而支持项目的成功实施。

1.3.3　新车型开发流程图

根据系统工程理论，建立新产品开发过程 V 模型（图 1-7），以便深入理解车辆开发项目中，创新和分析过程的相互融合。

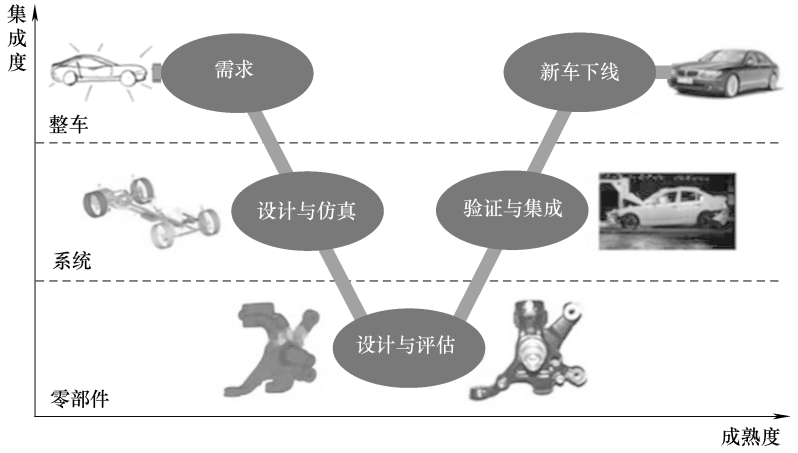


图 1-7　新车型开发过程 V 模型应用

新产品开发过程 V 模型，第一个 V 分支（左边）从上向下，最上层为整车需求（规格参数），中间层面为系统设计和仿真，最低层面为零件的规格参数、设计和评估。第二个 V 分支（右边）从下向上，在最低层面，根据零部件相应的规格参数，进行零部件设计、测试和验证；中间层面完成系统和整车的验证与集成；最后完成工程签发，而系统的设计和验证均在 V 模型中间层面上。

与信息技术系统开发相比，汽车开发需要在不同开发阶段创建原型样车，并需要对生产过程的不同阶段进行产品性能测试与评估。原型样车（见 3.3.4 节）是新产品自身的实现过程。因此，整车开发流程也包含了若干子系统的开发过程 V 模型。

1.4　汽车开发项目管理

汽车项目管理的任务是组织并管理各种资源，如资金、人力、材料、能源以及空间等，通过这样的方法，将开发项目分成多个目标来逐一实现（范围、品质、时间及成本）。汽车

项目管理包括在新产品开发流程过程中的规划、控制和决策。根据国际电子电气工程师学会标准（IEEE 1490—2003），项目管理的九条法则是：集成管理、产能管理、时间管理、成本管理、质量管理、人力资源管理、沟通管理、风险管理、采购管理。

如前所述，汽车开发项目是由许多节拍构成的，各个节拍点规定了应完成的工作和应交付的图纸。与其他项目管理方法相比，汽车项目管理通常设置节拍点（milestones），要求从属于同一个项目的所有开发流程都保持同步。

整车项目开发状态和节拍点的一个很好的案例是开始制作原型样车。此时，各零部件研发中心必须发布一系列配套的汽车零部件，而根据整车集成流程，这些零部件应该已经完成签发。同时，发布的原型样车也推出相配套与协调的批量生产流程。只有这样，才能在创建高品质原型样车的同时，发挥最佳的传媒效果。

由于项目是由一系列这样的节拍点构成的，相应地所有的开发工作也应同步（synchronized）。因此，它们也被称为同步节点（Synchro-Points，SP）。为了保证所有开发子流程都在各个同步环节间正常地运行，这些子过程也是由子同步点（Mini-Synchro-Points，MSP）构成的（图 1-8）。

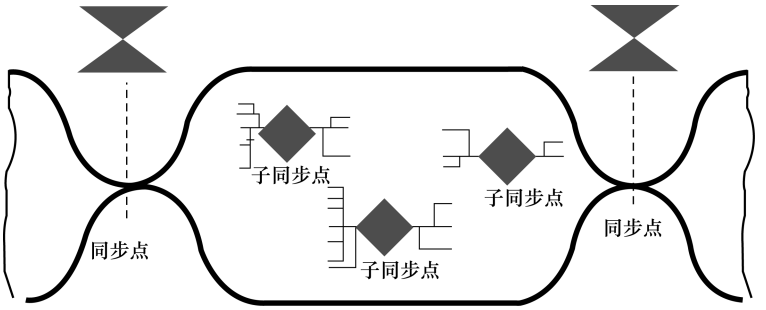


图 1-8　由同步点与子同步点构成的产品开发流程

1.5　全球合作开发项目

为了在经济全球化程度越来越高的市场中保持竞争力，各汽车公司致力于开展跨地区、跨社会文化背景、跨技术领域的合作。其达到全球化的目的，主要有以下一些方法与手段：

- 通过在当地销售产品和进行售后服务，增加营业额；
- 通过利用当地的生产技术和人力资源，有效地提高生产效率；
- 通过在当地采购零部件，降低运输费用和减少进口关税；
- 通过使用当地货币支付，减少币值波动汇率风险（自然对冲）；
- 通过吸纳本土工程师参与到产品设计，满足本土化需求；
- 通过扩大潜在供应商和合作伙伴，提高市场占有率。

为了推进汽车产业全球化战略，当务之急是设计开发工程师必须在整车制造商和零部件供应商两方面都能建立合作关系：为了将一款新车型推向一个全新的市场，必须全面地评估当地的生产条件和法律法规（以导航系统为例，它只能在开发和生产该款车辆的国家进行测试）。在国外启动一个新车生产线时，当地的工程师必须参与到整车开发流程优化中。同

样，当地供应商的工程师也必须集成到车辆开发流程中。协同合作共同开发是充分发挥全球化潜力的关键之一。为了使它能发挥实实在在的作用，必须认识和处理一些障碍。

社会文化差异是两个主要障碍之一。文化差异首先会通过语言、服饰、个人习惯等表现出来，然后通过思维方式和价值观逐渐体现出来。比如，在美国人与德国人组成的研究团队中，表现为个人主义和集体主义的一些基本心理差异，以及规避危险的方式。个人主义者专注于自己，而集体主义者把集体利益放在个人利益之前。美国人比德国人更加专注于自身，是典型的个人主义者。在规避危险方面，美国人较少考虑个人安全感，而对个人创业的想法和个人能力更加自信。德国人做事更严谨，更喜欢一个系统性的工作流程；而美国人不拘小节，喜欢即兴发挥。德国人深思熟虑后才会做出决定，而美国人即使在信息不充分时也想要一个最直接的结果。

这些差异在语言和沟通过程中也会体现出来：一般来说，美国人为人简单，说话明确，不拘小节，幽默和友好；德国人更严谨，细心，正经，保守和直接。

最后，如果需要跨区域交流，必须要认识和克服因距离产生的障碍。比如，交流的双方不可能像在走廊上碰面一样去讨论一个具体的问题。合作者必须要努力建立沟通渠道。利用通信媒介传递信息时，对方自身无法获取交流双方的心情，例如，在传达信息时，由于通过邮件无法将想法完整地转化成文字而可能会使对方产生误解。因此，团队合作要努力增强双方的沟通交流，并能够意识到可能出现的问题，然后采取积极主动的态度澄清事实，并进行细心的解释以消除误解。

除了社会文化方面的差异，还有商业环境方面的差异：必须考虑技术、教育和法律法规等多方面因素以确保国际合作的成功。

1）技术障碍条件。气候差异可能会对制造工艺转换产生负面影响，如胶合工艺；电能供应的差异不仅体现在电压上，还体现在频率和稳定性上；不同国家在如何实施产业工人的职业教育上或多或少有不同的描述。

2）材料和标准件。不同国家的工程师偏好选择不同的材料——已经收集了有关这些材料成形、加工和设计的专业知识。虽然可利用其他材料代替，但通常更加昂贵，或者需要进口。例如，紧固件、执行机构、软管、密封剂之类的标准件，不同国家之间在尺寸、几何形状、规格/性能等方面存在差异。

3）开发标准。材料性能、测试、公差和制造工艺是根据不同的标准制定的，比如，欧洲是根据德国标准（DIN）、欧洲标准（EN）或国际标准（ISO），而美国是根据美国汽车工程师学会（SAE）和美国材料与试验协会（ASTM）的标准。

4）法律背景。国际合作一个重要的界定条件是可适用的法律体系。例如，忽略美国法律体系中的特殊条款，对外国公司来说，这不仅涉及产品责任还要承担巨大的风险。其他具有重要差异性的法律领域，还包括专利法、医疗保健和企业税务。

总之，整车开发过程中必须考虑到贸易中的文化、技术和法律方面的各种差异，同时，必须权衡可能从合作中所获得的利润和克服上述合作中产生的障碍。另外，整车开发将来自不同背景和经历的人的思维成果汇集到一起。可预期提出多种解决方案及各种细分的市场产品，来提高市场的接受度和渗透力度，由此提升公司声誉和市场份额。

第2章

新车型开发战略

2.1 概述

一个全新车型的开发需要几亿元甚至十几亿元的大量资金投入，投资风险非常大，如果不经过周密调查研究与论证，就草率上马新项目，轻则会造成产品先天不足，投产后问题成堆；重则造成产品不符合消费者需求，没有市场竞争力。因此市场调研和项目可行性分析就成了新项目至关重要的部分。通过市场调研对相关的市场信息进行系统的收集、整理、记录和分析，可以了解和掌握消费者的汽车消费趋势、消费偏好和消费要求的变化，确定顾客对新的汽车产品是否有需求，或者是否有潜在的需求等待开发，然后根据调研数据进行分析研究，总结出科学可靠的市场调研报告，为企业决策者的新车型研发项目计划提供科学合理的参考与建议。

汽车市场调研包括市场细分、目标市场选择、产品定位等几个方面。项目可行性分析是在市场调研的基础上进行的，根据市场调研报告生成项目建议书，进一步明确新车型款式以及顾客目标群体。可行性分析包括技术可注册性分析、可行性分析与经济可行性分析，具体包括外部的政策法规分析、内部的自身资源和研发能力的分析，包括设计、工艺、生产以及成本等方面的内容。在完成可行性分析后，就可以对新车型的设计目标进行初步的设定，设定的内容包括车辆形式、动力参数、底盘各个总成要求、车身形式及强度要求等。

将初步设定的要求发放给相应的设计部门，各部门确认各个总成部件要求的可行性以后，确认项目设计目标，编制最初版本的产品技术描述说明书，将新车型（系列）的一些重要参数和使用性能确定下来。在方案策划阶段确定新车型是否开发相应的衍生车型，确定衍生车型的形式以及种类。项目策划阶段的最终成果应是一份符合市场要求、开发目标得到研发各个部门一致确认的新车型设计目标大纲。该大纲明确了新车型（系列）的形式、功能以及技术特点，描述了产品车型的最终定位，是后续研发各个过程的依据和要求，是一份指导性文件。图 2-1 为新产品的开发方案策划阶段划分。

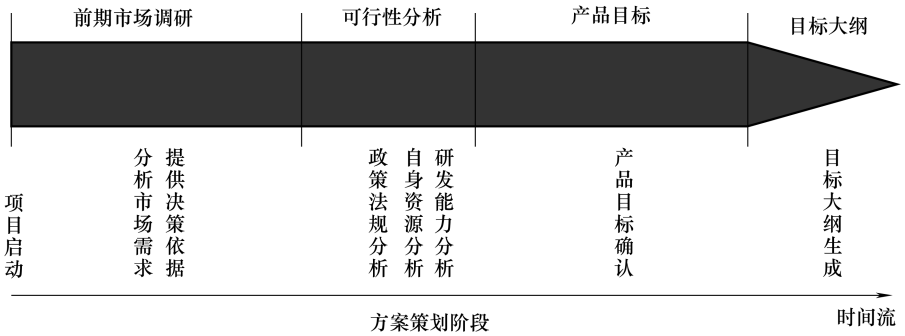


图 2-1　新产品的开发方案策划阶段划分

2.2　新车型开发成败案例

所谓新产品开发策略，是尽可能准确地预测未来若干年内消费者的潜在消费理念。最完美的新产品开发流程，也难以挽救一个错误的新产品开发策略方案。因此，新车型开发策略是新车型开发以及推动合作开发的最重要任务。新车型开发策略必须要解决以下几个问题：

- 未来潜在消费者将购买何种款式汽车，以及预计购买量是多少。
- 一个完整的产品组合是什么？如包括哪些汽车品牌、车型系列以及衍生车型等。
- 是否需要继续开发或重新设计？现有新车型和车型系列是否能够满足产能要求？

为了解答上述问题，必须综合考虑新车型开发的边界限制因素。例如：

- 客户需求：当超级大城市高度发展，同时大城市以及郊区的交通越来越拥挤时，汽车的某些特征如高速性以及动力学特性是否依然重要？
- 社会认可度：社会对于各种汽车的不同排放有什么看法？社会是否依然接受不断增长的私人轿车？
- 品牌价值：目前的品牌价值在未来是否依然具有吸引力？
- 法律法规：那些影响购买决策、开发、制造以及销售的法律法规，是否可能会在全球范围内推广？
- 企业策略：公司对于地理位置、员工以及技术等的长期规划是什么？
- 竞争优势：哪种车型会在竞争中脱颖而出？

在汽车工业发展的历史长河中，有一些成功到足以主宰那个时代的车型，也有一些车型开发完全失败的典型案例，均值得我们借鉴。俗话说，吃一堑，长一智。通过深入剖析成功与失败的缘由，有助于我们梳理出走向成功或避免失败的基本规律。

2.2.1　成功车型

对于汽车开发成功的定义，有很多种评比的方法，如汽车外观造型奖、顾客调查或质量评估排行榜、投资回报率等。然而，在汽车开发策略中，并不关注系列车型开发的详情，而更关注消费群体对某款新车概念的长久吸引力。而汽车制造商衡量车型开发成功与否的尺度，在于某款新车型的销售业绩。从这个角度出发，汽车工业发展史上开发最成功的五款车型分别为：丰田卡罗拉、福特 F 系列、大众高尔夫、大众甲壳虫和福特 T 型车系。

福特 T 型车是第一款在装配线上生产的汽车，当时开启了现代汽车工业的新纪元。从 1908 年到 1927 年，它的销量达到了 1650 万辆。其商业竞争上的成功，归功于在这种大批量生产方式下所带来的无比实惠的价格。1914 年，当其他厂商的汽车售价超过 2000 美元/辆时，福特 T 型车的装配时间为 93min，而售价仅为 850 美元/辆（到后来甚至降到了 300 美元/辆）。从 1917 年到 1923 年，这款车根本不需要做任何广告，但在同行竞争中销量却遥遥领先。

最后，成也萧何败也萧何，虽然福特一成不变的车型外观设计，使其具有高效生产与价格优势，但其他汽车品牌却在不断改进汽车外形风格，并提供给顾客更加舒适的驾车环境。1925 年，福特 T 型车失去了当时汽车销售市场上的竞争优势，并于 1927 年停止生产。

另一款一直保持其最初设计理念的车型是大众甲壳虫（图 2-2a）。据不完全统计，从

1935 年投产到2010 年共生产了2264. 9 万辆，超过福特T 型车，使其在历史销量排行榜中雄踞第四位，成为历史上最富有传奇色彩的、最为成功的车型之一。与其竞争对手（当时的雪铁龙 2CV 车型）相比，大众甲壳虫性能更加出色，操作感更好，而且购买和维护费用更低廉。再加上其独特的车身风格，大众甲壳虫无可非议地成为当时广大消费者心中最时尚、最具价值的车型。

a) 大众甲壳虫

b) 大众高尔夫

c) 福特F系列

d) 丰田卡罗拉

图 2-2　史上最成功的车型案例

1974 年，当甲壳虫的热度开始衰退之际，大众又推出了他们的第二款热门车型——大众高尔夫（图 2-2b）。高尔夫的成功之处在于，它当时在紧凑型轿车领域中创造了新的汽车概念（水冷式前轮驱动、发动机横置、掀背式后盖），高尔夫让任何人都可以买得起，它在提供了足够容纳 5 个人以及行李空间的同时，没有影响其动感且酷炫的外观特征。高尔夫在紧凑型轿车系列中具有垄断地位，以至于紧凑型轿车也被称为高尔夫型轿车。在德国，那些生于 1965 ~ 1975 年的人被统称为高尔夫一代。截至 2015 年 7 月，高尔夫在全球范围内创造了 2719 万辆的销售业绩。

然而，高尔夫在美国却没有成为高销量车型，取而代之的是 1948 年福特公司推出的 F 系列皮卡（图 2-2c），它的成功要归功于高可靠性，这一切都来自于其鲁棒性设计，多样化的车身、内外饰件选配件，及其实惠的售价。福特 F 系列皮卡已经生产了 60 多年，现如今已经开发到了第 11 代，而且连续 23 年荣膺“全美最佳销量汽车”。截至 2013 年，福特 F 系列皮卡在北美的销量超过了 3390 万辆。

1966 年，丰田推出了卡罗拉车型（图 2-2d）。它的风格相对单一，但却凭着高品质和高性价比赢得了顾客的青睐。如今，丰田已经连续销售这款富有魅力的车型达 50 年之久，并推出了第 11 代卡罗拉，使其各项质量和可靠性指标在同类型汽车中名列前茅。截至 2015 年初，卡罗拉全球销量已超过 4100 万辆。

2.2.2　失败车型

销售排行榜上业绩居首车型的成功原因是多种多样的。同样，也有一些车型无法达成预期的销售计划，本书称它们为开发失败车型。需要重申的是，市场上的成功远远比设计质量重要。某些开发失败的车型虽然在技术方面极为先进，但是消费者不认可；或者错误地估计了未来消费者的需求，太过于依靠创新设计上的吸引力；或其市场营销能力太弱。这里有 4 款具有代表性的开发失败车型——福特埃德塞尔、格拉斯 2600、雷诺古贝以及标致 505，虽然开发人员满怀期待，然而制造商无法说服消费者去购买它们。

在汽车史上，名气颇大却销量奇差的典型车型，应该归属于福特汽车公司于 1958 年至 1960 年开发的福特埃德塞尔（Ford Edsel）（图 2-3a）。这款车型的设计概念及性能当时颇为先进，然而经历了一系列事件之后，它在市场竞争中以失败告终。这就是所谓的“有着拗口名字，在错误的时间里开发的错误车型，当时经济环境需要小型车辆时，反而错误地把汽车设计得如此豪华”。

a) 福特埃德塞尔

b) 格拉斯 2600

c) 雷诺古贝

d) 标致505

图 2-3　失败车型案例

另一款设计完美无瑕，且能被顾客接受，但最终成为一场经济灾难的车型是格拉斯（Glas 2600 V8）（图 2-3b）。格拉斯的新产品策略团队，在 20 世纪 50 年代曾开发了格哥摩（Goggomobil）车型而名声大噪，1966 年希望通过开发格拉斯 2600 V8，绰号“格拉斯拉蒂”，来实现其品牌高端化转型的目标。这是一款技术卓越的运动款高端车型，但是由于格拉斯公司内部的总体架构，还没有为生产高端车做好准备，顾客也不认同其高端品牌与产品形象，从而导致生产费用持续上升，最终陷入了财务危机。然而格拉斯 2006 V8 预开发车型系列已经完工，并在 1966 年被宝马公司收购。

雷诺古贝（Renault Avantime）（图 2-3c）是由马特拉（Matra）设计公司在 2001 年到 2003 年设计制造的。它具有前卫和独特的设计风格，是厢式轿车和两厢轿车的混合体。21 世纪初，雷诺雄心勃勃地开发了这款车型，但是顾客根本就不买账，销量很差，项目开发也陷于绝境，最终导致马特拉公司破产，并在 2003 年离开了汽车制造行业。同时，在仅仅生

产了 8545 辆以后，雷诺古贝车型就停产了。

法国标致（PEUGEOT ）505 车型（图 2-2d）是新车型开发失败的典型案例，它也是至今在中国市场里唯一“失败”了的车型。广州汽车和法国标致汽车公司合资后生产标致 505 轿车和 505SW 皮卡车，在当时可以说是性能较为先进的车型，外形流畅、大气（至少比同期的普桑、富康、捷达都强得多），发动机动力充足。在当时特定的历史时期里，由于一汽大众尚未成立，上海大众也未成气候，广州标致 505 系列车型一出炉就成了众人哄抢的“香饽饽”，在国人心中，标致“雄狮”的知名度绝不亚于宝马、奔驰，到 1991 年，广州标致在国内的市场占有率就达到了 16%，市场前景一片大好。

双方的合作分歧首先在于对汽车认识上的差异，中法两国的汽车文化有本质的不同，在新产品布局与目标顾客群体上，法方没有认真地研究分析中国汽车市场的特点。其次，双方在产品开发策略目标上存在分歧，广汽的主要经营目标是通过建立合资企业，带动汽车工业乃至整个地区的工业发展，所以推进国产化进程是工作的重点；而法国标致的主要经营目标是通过建立合资企业在短期内获得高额利润，因此对零配件国产化积极性不高，导致售价太高，顾客认为其性价比不高。最后，是在组织机构设置方式上，法国标致采用直线职能制，实行层级管理，强调专业化分工和协作，同时采用了法国标致的全套规章制度。这套规章制度具有一定的科学性和合理性，法国人工作严谨，要求员工丝毫不差地遵守各项规章制度，100% 达到标准。但改革开放初期的中方员工由于长期处在缺乏就业竞争的环境下工作和生活，对规章制度的执行不够严格，而且受人员素质及机器设备先进性影响，许多工作难以完全达到有关标准。

从 1992 年开始，广州标致 505 型轿车的市场份额被老三样（普桑、富康、捷达）一步一步蚕食，销量急剧下滑，生产规模迅速下降，1994 年，广州标致的库存量达到了最高值，车辆堆满了位于黄埔的工厂停车场，连附近稍宽的马路也被 505 车型占据。据说，后来工厂实在找不到地方停放车辆，厂里的相关领导还跑去租用附近的机场用以停车。据统计，当时广州标致工厂累计库存超过 8000 辆，当年广州标致出现了 6800 万元的亏损，1995 年亏损额高达 3. 2 亿元。1997 年，广州标致彻底“破败”，年销量不足 1000 辆，公司累计亏损额达 29 亿元，本田汽车公司以 1 美元价格买断标致在广州标致的所有股份和债务，与广汽合作 12 年之久的法国标致得以抽身。

广州标致 505 在中国 12 年间经历的辉煌与衰败，正是广州标致合资公司在那个特定时间段的历史见证。它是中国最早的“驾驶者之车”，却也成为中国汽车市场上第一个退市的合资品牌车。

2.3 新车型开发成功的先决条件

深入反思上述成功和失败车型的典型案例，可以加深我们理解车型项目开发成功所必备的先决条件。新产品策略决定一款车型市场成功的四个基本要素：全球化的市场布局、协调一致的车型组合、个性鲜明的品牌形象以及适应潜在客户需求的产品形象。

2. 3. 1 全球化的市场布局

为何丰田能售出超过 4000 万辆卡罗拉？因为它不仅实用、可靠性好、物美价廉，而且

自始至终迎合了世界各地几乎所有市场的顾客需求。这归功于丰田公司遍及全球的生产网络。53 家海外（日本境外）制造商遍布 27 个国家和地区，在北美、欧洲和亚洲均设有研发中心，可以根据当地市场需求和消费偏好来定制基于基本车型的改款车型。

消费者希望规模化生产的车型能够适应各地的偏好，同时也希望保留一些风靡全球的高档车型设计元素和款式。以宝马 X5 为例，虽然各地的法律法规有所差异，但只有一个工厂制造这款全球畅销车型，并且按照同一种模式进行销售。

同样，新款 MINI 也是一款全球化车型，生产基地位于英国牛津市。在 2001 年新车下线时，优异的市场运作将它成功推至全球畅销车的行列，甚至还形成了风靡全球的 MINI 车友会。

当今，全球汽车市场被划分为两大部分：原有的三大汽车市场（北美、欧洲和日本）的汽车销量似乎已经达到饱和，而新兴市场（如中国和印度）表现出强劲的增长势头。在近十年时间内，中国汽车销量大幅上升，已经成为全球汽车销量最大的国家。图 2-4 显示了从 2010 年到 2015 年，各大汽车销售市场乘用车销售量。2015 年中国累计生产汽车 2459. 76 万辆，同比增长 4. 68%，其中乘用车销量 2114. 63 万辆，同比增长 7. 3%，连续六年产销量保持全球第一。

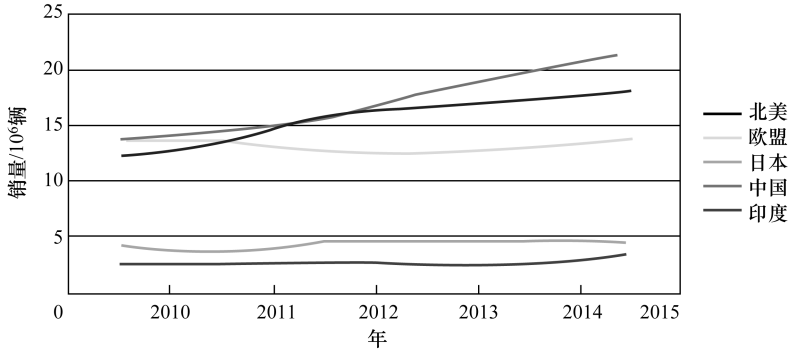


图 2-4　特定市场的乘用车销售量（来源：中国汽车工业协会）

2. 3. 2　完整的产品系列

平衡与协调的投资组合是实现财务持续盈利的基本准则，这也是汽车制造商为实现长期的市场盈利而确定车型组合的前提条件。制造商在确定车型系列时需要在市场需求、公司开发和制造产能之间找到一个平衡点：从市场的角度来看，必须有一个完整和持续的车型组合，并在维持鲜明的共同品牌形象的同时，各种车型根据其功能、规格、性能和舒适性具有鲜明的差异性。如果产品组合延展到不止一个品牌，则在扩展产品组合的同时，需要保持鲜明的品牌形象，而且不同品牌之间必须按其品牌价值走差异化路线。此外，从商业的角度来看，所有开发车型都应该共享尽可能多的零部件，以达到优化开发工作、减少采购数量和提高生产柔性的目的。

例如，宝马公司曾在 1959 年遇到了一次严重的危机，差点使得公司出售给戴姆勒-奔驰公司。出现这个危机的原因，是宝马的产品组合单一，从最低端车型依赛塔（Isetta）到最高端配备 V8 发动机的豪华车型之间，缺乏中型轿车系列（图 2-5）。当时消费者的印象中，宝马品牌形象模糊不清。此外，这两款车型差异巨大，导致在技术层面不可能共用零部件和

相应的生产设备，这使得每售出一辆当时的宝马 507 轿车，公司就要亏损 4000 马克。

1960 年，宝马成功推出了 700 车型系列以及后续 1500、1800 与 2000 车型系列，通过开发一系列新产品，完善了产品组合，从企业战略层面踏上了复兴之路。2007 年宝马汽车已有 22 款车型组合（图 2-6），而 2017 年宝马汽车已有宝马 i 纯电动汽车等 40 多款车型组合。

尽管产品组合存在空档会严重损害品牌形象，但过于重叠与类似的车型组合同样会降低区分度。2000 年初，大众公司基于高尔夫（Golf）和宝来（Bora）衍生车型推出了两款处于同一级别、同一品牌的旅行轿车。消费者没有发觉两款车型之间的明显差异，从实际效果来看也没有增加销量，这就浪费了第二款车型开发、制造、销售的额外费用。

图 2-5　1959 年宝马产品系列（来源：宝马）

图 2-6　2007 年宝马汽车产品系列（来源：宝马）

同样，一个公司的不同品牌之间如果不能划清界限，那么不同品牌的车型销售业绩也会大打折扣。在这里，大众又是一个例子。在它的平台化战略上，子品牌之间的差异在一定程度上被模糊化了，这导致车型的内部竞争和销量的互相牵制。例如，消费者发现大众高尔夫（VW Golf）和斯柯达明锐（Skoda Octavia）共享同一个开发平台，这使得一部分消费者掂量两款车型的售价与配置，精明的顾客会选择最高配置的明锐，而不是基本配置的高尔夫。

2.3.3　良好的品牌形象

品牌形象是潜在消费者对某品牌价值和情感的集合。这是历经数十年积淀在公众心目中的品牌产品、营销和公司自身形象。在汽车产业中，品牌形象甚至比车型技术参数更能影响客户的决定。大多数顾客有品牌情结，是某品牌的忠实粉丝，终生只购买该品牌的车型。

据资深投资人根据 Bloomberg（彭博）网站最新数据获知，全球主要汽车制造商市值排名正式出炉（表 2-1），该数据截至 2017 年 6 月 30 日财报。

表 2-1　全球主要汽车制造商市值排名

排　名	制　造　商	国　家	市值/美元	销售额/美元
1	丰田汽车	日本	1839 亿	2576 亿
2	戴姆勒	德国	789 亿	1739 亿
3	大众汽车	德国	770 亿	2455 亿
4	宝马汽车	德国	612 亿	1063 亿
5	特斯拉	美国	580 亿	100 亿
6	通用汽车	美国	518 亿	1650 亿
7	本田汽车	日本	506 亿	1307 亿
8	福特汽车	美国	429 亿	1535 亿
9	日产汽车	日本	418 亿	1086 亿
10	现代汽车	韩国	283 亿	827 亿
11	雷诺汽车	法国	264 亿	606 亿
12	铃木汽车	日本	250 亿	301 亿
13	菲亚特克莱斯勒	意大利	228 亿	1223 亿

从全球主要汽车制造商 2008 ~ 2017 年市值走势（图 2-7）中可看出，丰田汽车在近 10

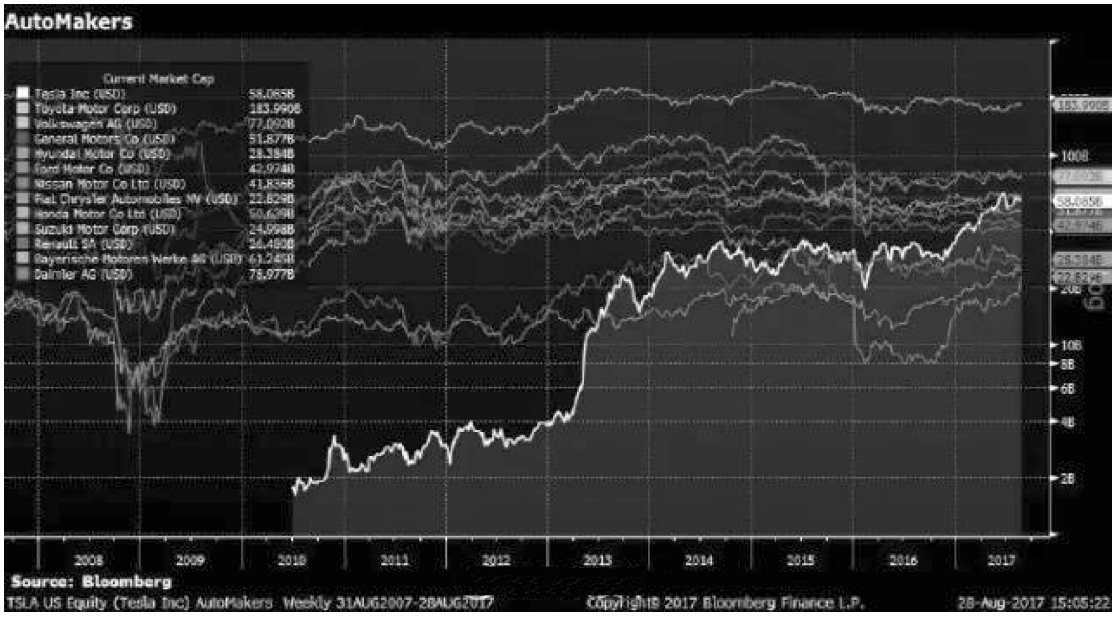


图 2-7　2008 ~ 2017 年全球主要汽车制造商市值走势图

年基本处于绝对的领先地位。而唯一的亮点是，一个异军突起的、可以称得上颠覆性存在的企业——特斯拉，目前市值已经上升至全球第五位，位于宝马之后；仅在美国地区，也超越了老牌汽车厂商福特、通用，一跃成为美国市值最高的汽车厂商，但特斯拉却一直都在亏损。在销售额上，特斯拉也是最低的，2016 年全球仅售出 8 万余辆，2017 年上半年交付共 47077 辆。

因此，在产品策划中，首要准则就是维持品牌形象的一致性，在公司长期市场运作中，需要创建与维护良好的声誉和顾客喜爱的品牌形象。如果公众感受到的品牌形象偏离其期望值，那么也需要通过长期的努力才能修复这种印象。

这里有一个为新产品设定品牌形象框架的案例：梅赛德斯-奔驰公司早期的产品组合只覆盖高级和中高级车型，后来开发 190 系列新车型，将其产品组合扩充至中型车系列。公司管理层并不太愿意推出这款中级车，因为他们担心这会削弱奔驰车的品牌形象，并对其品牌形象和已有车型销售产生不利影响。但最终 190 系列车型在 1982 年下线，获得了巨大的成功，也并未影响梅赛德斯-奔驰公司高档车型的销售业绩。1997 年，梅赛德斯-奔驰公司甚至还推出了 A 级车，将自己的产品线向下延伸到了紧凑型车型。1998 年，又将微型车投入市场，但是该车型系列的产品形象明显与梅赛德斯-奔驰的品牌形象不相符，于是被冠以 Smart 品牌进行销售。

有些公司过高地估计了其品牌在潜在客户心目中的地位，典型的例子就是大众公司在 2002 年下线的辉腾（VW Phaeton）车型。尽管这是一辆技术卓越的轿车，但是高端客户永远不会说服自己去购买一辆大众车型，因为在公众印象中，“大众”品牌是使所有大众均买得起的廉价车型。事实上，该车的销量远低于预期，2006 年辉腾车型被迫在北美市场停产。

2.3.4 清晰的产品定位

品牌形象是对一个品牌长期认知的描述，而产品形象则专门描述一款新车型（或车型系列）的开发目标。产品形象主要包括三个方面：产品定位、目标群体以及产品性能。这三个方面都必须紧跟技术、法律和社会的潮流。产品形象常常通过对竞争车型进行技术和经济分析作为开发的支撑。在图 2-8 中，新款 MINI 车型被各种车型环绕，它们都是新款 MINI 车型目标市场的代表性竞争车型。

图 2-8 新款 MINI 竞争力的分析（来源：宝马）

产品定位必须清晰，若想占领所期望的市场份额，决策者在产品定位时必须非常清楚以下问题：新车定位在哪个级别进行竞争？所开发的产品在该级别细分市场中，哪项汽车特性最佳（如最快、最经济、最便宜、最时尚、最酷、最小巧等）？

在描述目标群体时，决策者必须考虑全球和当地人口结构、购买力、消费习惯等因素的变化趋势。根据中国人口结构（图 2-9）可以预测，至 2025 年，老龄的消费群体将在市场中起到更加重要的作用，他们的需求特性，在制定产品策略时显得更加重要。

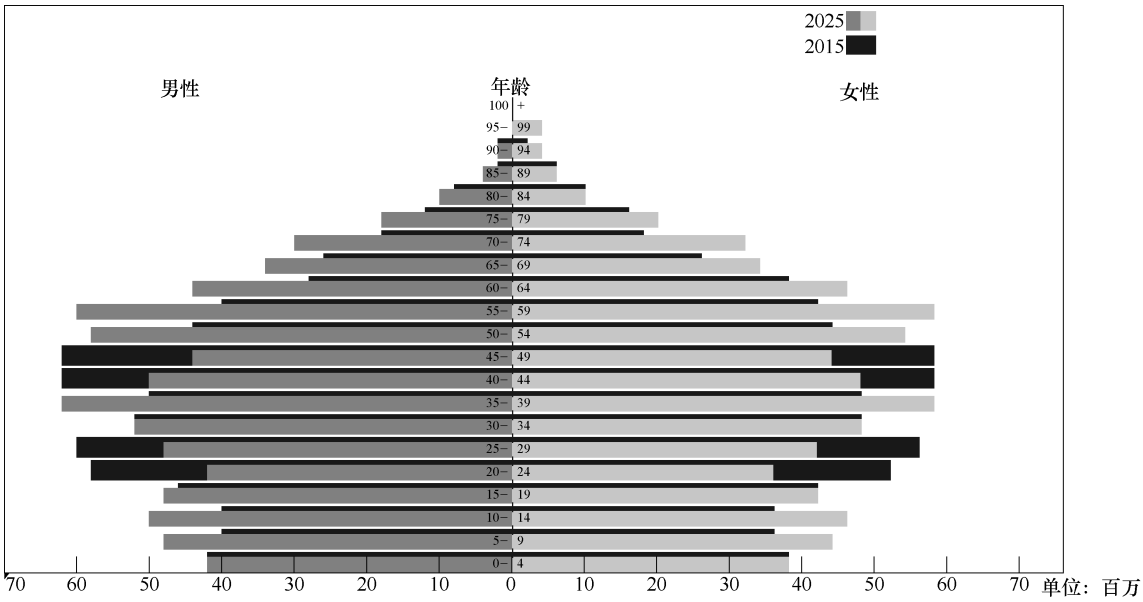


图 2-9　中国人口结构（来源：国家统计局）

另外一个大潮流是购买力从欧洲向亚洲的转移。预测表明，从现在到 2050 年，亚洲的购买力将会急剧上升，北美洲会保持不变而欧洲将会下降。其他一些因素也影响消费者的购买行为，如发展中国家人口不断涌向超大城市，及人们对于环境友好型汽车日益增长的需求等。

最后，未来汽车的外形也是表现其产品的物理特性因素之一。第一步是确定汽车的概念风格，如车身概念、比例、内饰和外形风格。此外，要保证汽车遵循未来的法律法规要求，如排放和油耗法规、安全性能的验证等。此外，产品形象还要考虑当地的特殊条件，如气候、交通情况，甚至人们的驾驶习惯。

新车定型的下一步工作不但要确定汽车的特性（如汽车动力学特性、舒适性和安全级别），还要确定一组基本配置和选配设施、产品的捆绑销售以及特别车型版本。这些工作也包括产品的创新，通过独特销售策略（Unique Selling Propositions，USP）最大限度地实现不同车型的产品差异化。通过有计划地评估车主拥有成本和残值使产品形象更加完美。

第3章

新车型开发流程

新车型的研发是一个非常复杂的系统工程，研发流程包括管理、设计、组织等方方面面的辅助流程，本章主要介绍新车型研发中的核心流程，也就是专业的整车设计开发流程，这一流程的起点为项目立项，终点为量产启动。主要包括方案策划、概念设计、系列车型开发、后续开发与产品改进四个阶段。

3.1 方案策划阶段

通过市场调研对相关的市场信息进行系统的收集、整理、记录和分析，可以了解和掌握消费者的汽车消费趋势、消费偏好、消费要求的变化，确定顾客对新的汽车产品是否有需求，或者是否有潜在的需求等待开发，然后根据调研数据进行分析研究，总结出科学可靠的市场调研报告，为企业决策者的新车型研发项目计划提供科学合理的参考与建议。

汽车市场调研包括市场细分、目标市场选择、产品定位等几个方面。项目可行性分析是在市场调研的基础上进行的，根据市场调研报告生成项目建议书，进一步明确汽车形式以及市场目标。在完成可行性分析后，就可以对新车型的设计目标进行初步的设定，设定的内容包括车辆形式、动力参数、底盘各个总成要求、车身形式及强度要求等。

在方案策划阶段，基于产品策略得到的产品形象在细化后构成一个一致的目标框架。接下来，就能在这个框架中，对一个汽车项目的技术、经济可行性进行整体评估（图 3-1）。当然，这个目标框架必须是可行且最优的，其中的冲突也要得到解决。

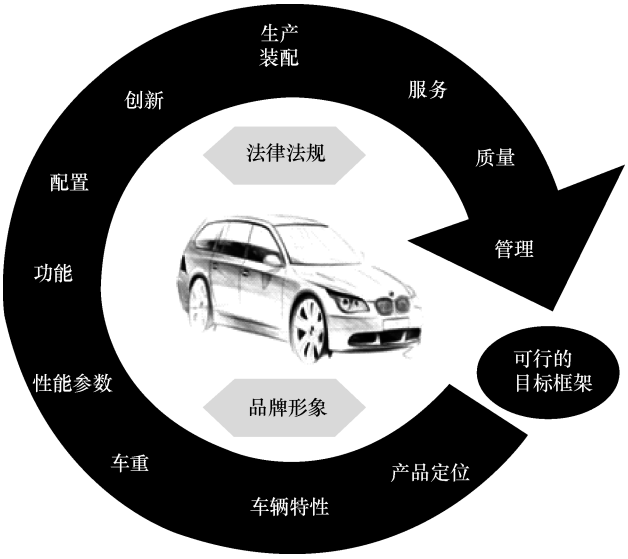


图 3-1 新车型的目标框架

3.1.1 技术可行性

对于一个汽车项目而言，技术可行性主要包括整车形状特征、初始（内、外饰）造型设计、早期生产布局方案几个方面。

汽车的设计流程（将在 7.2.1 节中详述）开始于初始阶段。研发人员选定大体的车身概念，基于计划好的汽车功能开发主要部件，并大致确定它们在汽车中的安放位置，同时绘

制出内饰、外饰造型草图。初始零件布局过程（通常属于二维设计），是对临界尺寸链的分析并解决它们之间的冲突。以图 3-2 为例，这是一张车厢后座的尺寸链示意图，该尺寸链从后车身顶盖开始，经过顶篷内饰、后座乘客（头部、肩背和臀部）、后座泡沫垫、车厢地板、隔音材料及油箱，最终止于底板护板。在整条尺寸链中，根据设计要求，需要解决一系列目标冲突：

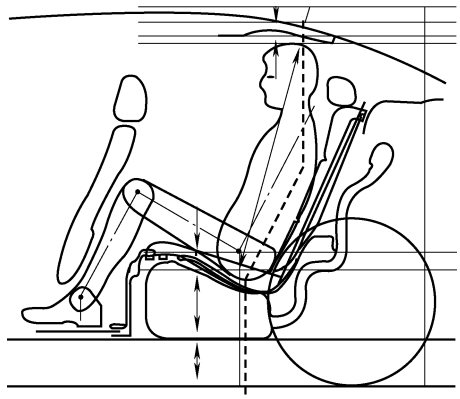


图 3-2　后排乘客舱临界尺寸链（来源：宝马）

- 为使车辆有良好的动力学外观，车顶轮廓应尽量低平；
- 为了降低车内噪声，需要分别在车顶和底盘（后座下方）安装厚实的衬里及隔音材料；
- 当一个中等身材的成年人坐在后座时，应该使其有足够的头部空间，以符合人机工程学；
- 后座乘坐舒适性主要取决于坐垫泡沫的厚度；
- 油箱通常位于车厢地板隔音材料与底板护甲（区别于车辆底部轮廓线）之间，因此两者间的距离决定了油箱容积及车辆的续驶里程；
- 汽车离地间隙（车身与路面的最小距离）决定了如操控性、空气阻力与升力、越野能力等整车特性。

除了与汽车直接相关的特性，目标框架还必须解决与计划生产、采购、服务相关的问题：为了满足项目对生产地、技术能力、产能和供应网络等方面的要求，需要选择（或扩建、新建）一家或多家生产工厂。而且，新车型必须与现存的销售与服务体系相适应，否则就需要扩展（或新建）这些体系。还要预先估计所需的营销策略。对于新的或重生的汽车品牌的第一个车型，必须规划好一个完整的营销理念。

产品目标框架还包括一个通用的结构，它决定了新车型中哪些零部件可以从已量产车型中重复使用。如果开发项目包括整个车型系列，那么目标框架必须涵盖并且适用于车型系列的所有改款车型。它的通用结构还必须与基本车型的独有部件或唯一改款车型的单一部件相适应，还要与更多改款车型的共用部件适应。因此，在一个车型系列中，所有改款车型的初始阶段是与基本车型同时启动的，而改款车型接下来的各个阶段的启动时间是相互独立的。

3.1.2　经济可行性

在初始阶段的末尾，基于对整个汽车开发生命周期各类收入和支出的合理假设，针对新车型或车型系列提出一个一致可行且必须有效的商业方案（图 3-3）。根据这些图表，只有在得到一个切实的投资回报（ROI）或是净现值（NPV）后，项目才能继续并引入概念阶段。这个商业方案通常是由一个代表公司策略、市场、研发、采购、生产和财务的团队提出的。

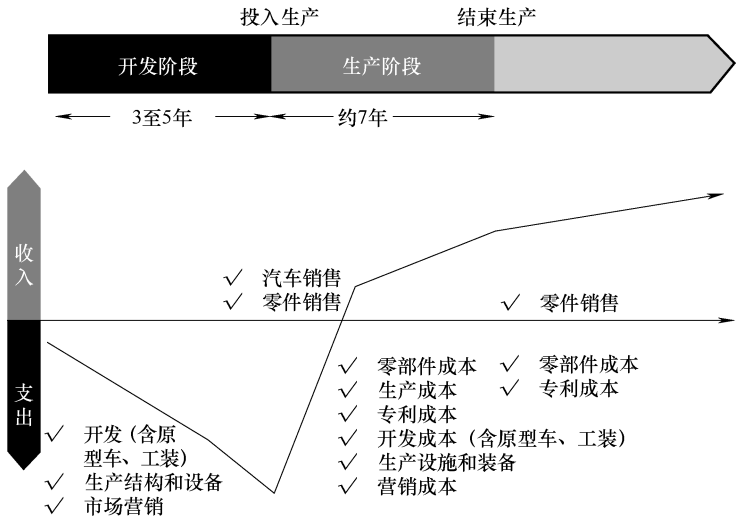


图 3-3　汽车开发整个生命周期的收支状况

表 3-1 是一个汽车开发项目的财务状况示例，希望能给读者一个直观的感受。

表 3-1　某汽车开发项目的财务样本

单车售价	43000 欧元
计划产量	25 万辆
生产周期	84 个月/7 年
投资	7 亿欧元
开发支出	4 亿欧元
单车制造成本	16000 欧元

基于表 3-1 所述数据，作为该商业案例的主要财务指标，净现值（NVP）经计算为 30 亿欧元。图 3-4 显示了项目每年的收支状况以及相应的净现值曲线。

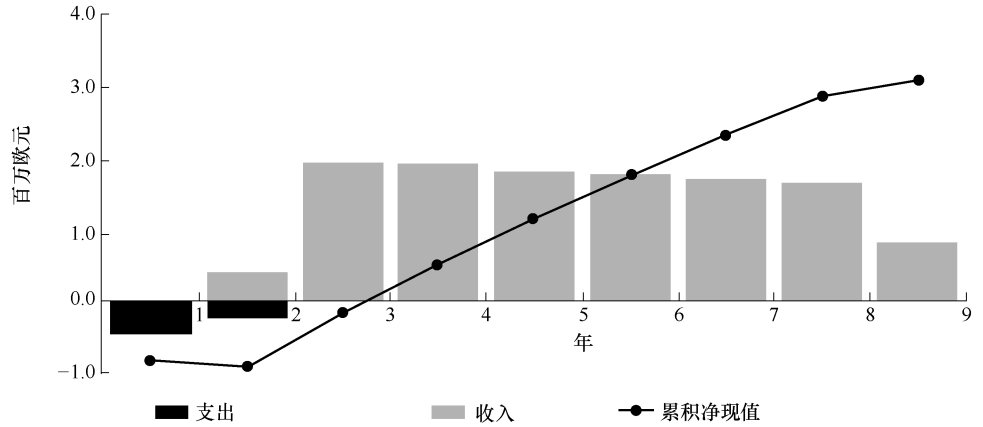


图 3-4　某汽车项目的收入支出和净现值

最终的净现值是一个十分重要的指标，因为它将决定是否要继续推进这个项目。所以研

发人员不仅要估算它的数值，还要了解其敏感性，这都是非常关键的。如果表 3-1 中假定的数值发生如下波动，那么将导致净现值产生 ±5 亿欧元的偏差：

- 单车售价 ±500 欧元（±1.1%）；
- 销售量 ±10000 台（±4.0%）；
- 单车制造成本 ±500 欧元（±3.1%）；
- 投资 ±7000 万欧元（±10.0%）。

将初步设定的要求发放给相应的设计部门，各部门确认各个总成部件要求的可行性以后，确认项目设计目标，编制最初版本的产品技术描述说明书，将新车型的一些重要参数和使用性能确定下来。

3.2　概念设计阶段

概念设计阶段开始后就要制定详细的研发计划，确定各个设计阶段的时间节点；评估研发工作量，合理分配工作任务；进行成本预算，及时控制开发成本；制作零部件清单表格，以便进行后续开发工作。概念车设计阶段的任务主要包括总体布置草图设计和造型设计两部分。

3.2.1　新车型概念设计

在概念设计阶段，为了确保在所开发的汽车推出时，其性能能够达到预定要求，新车的设计必须把目光放得足够长远。因为在该阶段，产品的主要表现形式是虚拟样机和 3D 实体模型（详见第 5 章）。首先采用油泥模型设计汽车内外饰表面，在这之后将其转换成 CAD 数据。为了评估整车特性，进而验证汽车概念设计，需要由设计中心创建三维 CAD 模型，并在整车集成的虚拟过程中进行分析。图 3-5 展示的是驾驶人人体工程学、空气动力学、转向系统和生产的虚拟评估。这些评估以及其他整车特性的评估在第 8 章和第 9 章中将进行详细的论述。

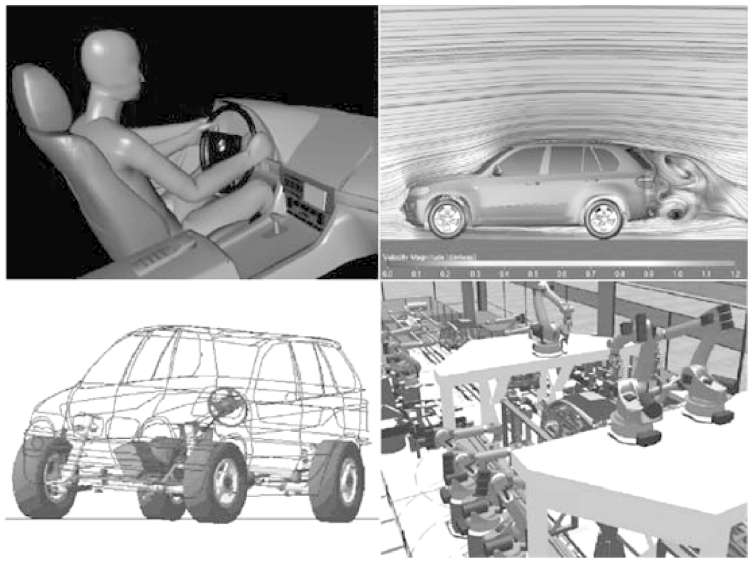


图 3-5　基于虚拟三维模型的汽车概念验证（来源：宝马的人力解决方案）

即使大多数整车特性可以基于三维 CAD 模型进行模拟仿真，但是概念验证（特别是汽车的转向灵敏性）中还是需要实车验证的。现有的车辆模型中，底盘和部分传动系统已被更新到了概念设计阶段的新模型上。

虽然在初始阶段，新车开发项目是由较小的初始团队来管理的。但是在概念阶段开始时，职责已被转移到一个综合性的项目组织机构。这个项目组织机构委任、监控并控制各个分散的概念设计团队，制定必要的会议计划和报告的结构，来实现最优合作。当前的组织模式是：不同整车制造商构建车型系列和车型项目的组织模型是相似的，他们的主要区别在于各自项目经理的优势不同，尤其是零部件开发中心经理。

3.2.2 整体布置草图

整体布置草图也称为总体布置草图、整车布置草图。绘制汽车总体布置草图是汽车总体设计和总布置的重要内容，其主要任务是根据汽车的总体方案及整车性能要求提出对各总成及部件的布置要求和特性参数等设计要求；协调整车与总成间、相关总成间的布置关系和参数匹配关系，使之组成一个在给定使用条件下的使用性能达到最优并满足产品目标大纲要求的整车参数和性能指标的汽车。而总体布置草图确定的基本尺寸控制图是造型设计的基础。

总体布置草图（图 3-6）的主要布置内容包括：车厢及驾驶室的布置，主要依据人机工程学来进行布置，在满足人体舒适性的基础上，合理地布置车厢和驾驶室，发动机与离合器及变速器的布置，传动轴的布置，车架和承载式车身底板的布置，前后悬架的布置，制动系统的布置，油箱、备胎和行李箱等的布置，空调装置的布置。

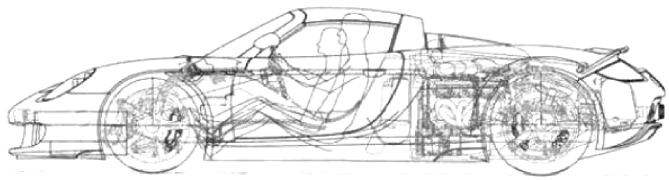


图 3-6 整车总体布置草图

3.2.3 整车造型设计

在进行了总体布置草图设计以后，就可以在其确定的基本尺寸的基础上进行造型设计了。汽车的造型设计现在已经成为汽车研发中至关重要的环节，包括外形和内饰设计两部分。而造型设计过程也分为设计和模型制作两个阶段。汽车造型设计师根据要设计的车型，首先收集同类车型的图片资料，对同类车型进行造型上的比较，根据这些车型在市场上的受欢迎程度，总结出目前流行的一些设计趋势以及时尚元素，作为设计的主题，如简洁、复古、前卫等。

设计阶段包括设计草图和设计效果图两个阶段。设计草图是设计师快速捕捉创意灵感的最好方法，最初的设计草图都比较简单，也许只有几根线条，但是能够勾勒出设计造型的神韵，设计师通过设计大量的草图来尽可能多地提出新的创意。每个设计师都会对少数几个自己认为比较好的草图进行完善，包括绘制多个角度的草图，进一步推敲车身的形体，突出造型特征等。图 3-6 所示是保时捷 918 设计草图，从中可以看出最初的草图形体是比较简练的，只强调部分的特征线。而后来的深入设计草图则比较完整地表达了车身的整个形态。

3.2.4 新车型项目概念书

基于目标框架以及在初始阶段制定的商业计划，在随后的初步设计阶段结束时，就需要

提交一份详尽、连贯、有定量化技术和财务目标的项目概念书。这份项目概念书包括以下几个主要的子理念：

- 产品理念；
- 生产理念；
- 采购理念；
- 市场销售理念；
- 服务理念。

为了保证新车项目开发目标具有定量的一致性，就需要应用目标管理系统与方法。使项目概念中的定量目标保持一致，这是重要的项目节点目标一致的基础。它标志着初步设计阶段的结束，同时因为它开启了系列车型的开发，并伴随所有与之相关的成本和风险，这表明在汽车开发项目中跨出了不能回头的一步（point of no return）。为此，管理人员不得不回答一些关键问题，例如：

1）新开发车型是否在技术和经济层面上可行？所有的预设功能是否能在计划的成本范围内实现？是否能满足国内外的法律要求？

2）销售价格和销量的目标是否现实？是否有足够的顾客愿意去买这些车？

3）汽车零部件供应商架构是否可行？是否所有潜在的供应商都有足够的经验和资源来保证按时保质交付？是否所有的供应商都有足够充裕的财产以保证即使在金融危机下也能按时交付？

4）生产指标是否可行？在现有的生产结构下能否制造出车辆或者在需要改变时，能否可以对正在进行的连续生产不产生意外冲击的前提下，在预期成本内准时实施？

5）项目目标是否可行？在计划的时间、成本、资源下，系列车型开发是否能够完成？

只有当上述问题的答案是肯定的，管理部门才会承担创业风险，开始对系列车型启动第一款新车的开发，这也意味着将要签署供应合同，并开始投入不可撤回的资金，如对系列工装设备的投资。

3.3　系列车型开发

3.3.1　工程设计阶段

在完成造型设计以后，项目就开始进入工程设计阶段。工程设计阶段的主要任务就是完成整车各个总成以及零部件的设计，协调总成与整车和总成与总成之间出现的各种矛盾，保证整车性能满足目标大纲要求。工程设计就是一个对整车进行细化设计的过程，各个总成分发到相关部门分别进行设计开发，各部门按照开发计划规定的时间节点分批提交零部件的设计方案。工程设计阶段主要包括以下几个环节。

1. 总布置设计

在前面总布置草图的基础上，深入细化总布置设计，精确地描述各部件的尺寸和位置，为各总成和部件分配准确的布置空间，确定各个部件的详细结构形式、特征参数、质量要求等。主要的工作包括发动机舱详细布置图、底盘详细布置图、内饰布置图、外饰布置图以及电器布置图。

2. 车身造型数据生成

车身或造型部门在油泥模型完成后，使用专门的三维测量仪器对油泥模型进行测量，测量的数据包括外形和内饰两部分。测量生成的数据称为点云，工程师根据点云使用汽车 A 面制作软件，如 Alias、IceM-surface、CATIA 等来构建汽车的外形和内室模型。在车身造型数据完成以后，通常要使用这些数据来重新铣削一个模型，目的是验证车身数据是否有错误。这个模型通常使用代木或者高密度塑料来进行加工，以便日后保存。

3. 动力系统选型与设计

一般新车型的开发首先需要选择汽车动力系统总成类型（如传统发动机、混合动力系统、纯电动或燃料电池动力系统），汽车动力系统部门的主要工作是针对新车型的特点以及要求，进行汽车动力系统布置和参数匹配，这一过程一直持续到样车试验阶段，它与底盘工程设计同步进行。

4. 白车身工程设计

所谓白车身指的是车身结构件以及覆盖件的焊接总成，包括发动机罩、翼子板、侧围、车门以及行李箱盖在内的未经过涂装的车身本体。白车身是保证整车强度的封闭结构。白车身由车身覆盖件、梁、支柱以及结构加强件组成，因此该阶段的主要工作任务就是确定车身结构方案，对各个组成部分进行详细设计，使用工程软件如 UG、CATIA 等完成三维数模构建，并进行工艺性分析完成装配关系图及车身焊点图。

5. 底盘工程设计

底盘工程设计的内容就是对底盘的四大系统进行详细的设计，包括传动系统设计、行驶系统设计、转向系统设计以及制动系统设计。主要工作包括：

1）对各个系统零部件进行包括尺寸、结构、工艺、功能等参数的定义。

2）根据定义进行结构设计以及计算，完成三维数模。

3）零部件样件试验。

4）完成设计图和装配图。

其中传动系统的主要设计内容为离合器、变速器、驱动桥，行驶系统的主要设计内容为悬架设计，转向系统的主要设计内容为转向器以及转向传动机构，制动系统的设计内容包括制动器以及 ABS 的设计。

6. 内外饰工程设计

汽车内外饰包括汽车外装件以及内饰件，因其安装在车身本体上，也称为车身附属设备。外装件的主要设计包括前后保险杠、玻璃、车门防撞装饰条、进气格栅、行李架、天窗、后视镜、车门机构及附件以及密封条。内饰件主要设计包括仪表板、转向盘、座椅、安全带、安全气囊、地毯、侧壁内饰件、遮阳板、扶手、车内后视镜等。

7. 汽车电子电器系统设计

汽车电子电器工程部负责全车的所有电子电器设计，包括刮水器系统、空调系统、各种仪表、整车开关、前后灯光以及车内照明系统。

经过以上各个总成系统的设计，工程设计阶段完成，最终确认整车设计方案。此时可以开始编制详细的产品技术说明书以及详细的零部件清单列表，验证法规。确定整车性能后，将各个总成的生产技术进行整理合成。

3.3.2　零部件产品发布

新车型工程设计完成后，接下来进入到新车型正式发布前的零部件详细设计阶段，它包括对汽车各个部分的明确描述（几何关系、材料、外观等方面）、软件开发、汽车零部件供应商签约。

汽车零部件产品发布是对供应商最强有力的约束，同时也引发了对汽车生产线有关制造工艺与工装设备的设计与采购。

汽车零部件产品发布的巨大经济意义在于，一方面约束了设计工程师在产品可靠性方面的个人责任，另一方面开始预算工装设备所必需的投资费用。为了保证最后所交付的新产品的成本、质量和可靠性方面达到设计目标，在系列化开发阶段就需要挑选并授权供应商。它们和整车制造商一起研发合作，实现系列化生产条件所需的工装、设备与工艺流程。为了实现新车型开发中的创新设计，整车厂还需要与高校、独立研发机构开展外包和研发合作（图 3-7）。

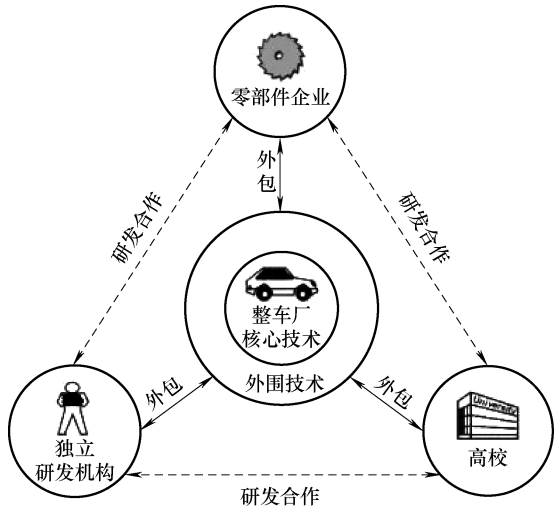
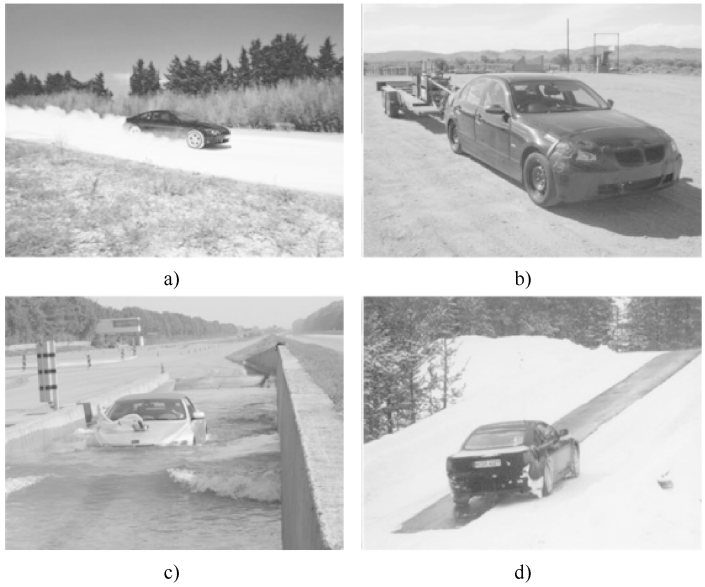


图 3-7　整车厂与零部件企业合作关系及其核心技术

3.3.3　整车集成阶段

在系列化开发过程中，核心任务是将各个部件和系统整合成一辆车，并使其符合合法性要求以及满足初始设计时所要求的整车特性。为了评估并最终验证，原型车、预量产化汽车、量产化汽车都会进行试验。图 3-8 表示了整车验证时的典型路面。



a)　b)　c)　d)

图 3-8　整车验证典型路面

3.3.4 样车试制阶段

工程设计阶段完成以后进入样车试制和试验阶段，样车的试制由试制部门负责，他们根据工程设计的数据，根据试验需要制作各种试验样车。样车的试验包括两个方面：性能试验和可靠性试验。

样车性能试验的目的是验证设计阶段各个总成以及零部件经过装配后能否达到设计要求，及时发现问题，做出设计修改，完善设计方案。

样车可靠性试验的目的是验证汽车的强度以及耐久性。试验类型有试验场试验、道路测试（图3-8）、风洞试验、碰撞试验等。试验应根据国家制定的有关标准逐项进行，不同车型有不同的试验标准。根据试制、试验的结果进行分析总结，对出现的各种问题进行改进设计，再进行第二轮试制和试验，直至产品定型。

在一个整车设计项目中，整车制造商通常制作与测试两组原型车：一组是早期样车，用作概念车的评估，由此进行一些必要的设计修改；另一组原型车吸收这些修改并验证其可行性。若在第二组原型样车推出之前，就投资大型零件生产所需的系列制造装备，则基于第二组样车的测试结果而更改设计的代价是非常昂贵的，同时也有延迟原计划投产的风险。

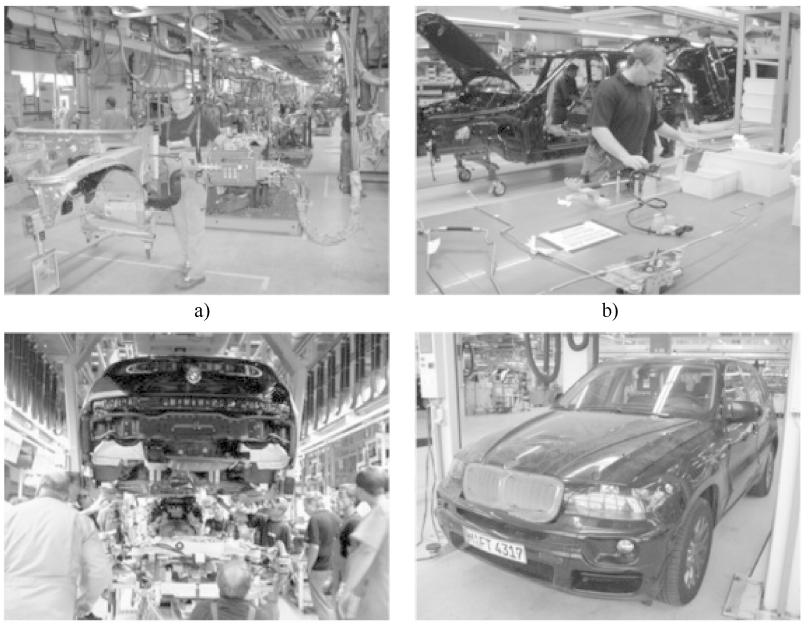
选择制作哪种样车的时机必须慎重。一方面，后来的版本可以将最新的解决方案纳入样车；另一方面，早期的版本可以更快得到测试结果，为可能的设计更改留出更多的时间。在一组样车中，不同样车投产的顺序是由用户以及测试的紧迫性决定的。比如，一次失败的碰撞测试会导致整个车辆结构的全面改变，故第一辆样车通常用来做碰撞测试。

为了获得真实的测试结果，原型车不能仅仅局限于在试验台上进行测试。然而，过早地在公路上暴露车身造型和其他设计特征会使竞争对手相应地调整自己的产品从而取得优势，更重要的是会降低当前车型对消费者的吸引力而对销量和售价产生负面的影响。出于这两个原因，样车通常会被伪装起来，开发初期会深度伪装，直到末期伪装程度才会减轻。

对样车进行评估是整车开发的主要成本之一。一款初期样车的花费就高达千万元。为降低所需样车的数量及成本，主要可采用以下三种方式。

- 配置：通过对需要测试原型车的各个测试部门之间的协商，来获取车身风格、发动机、变速器、左舵/右舵、各国版本的不同组合，使得所需原型车数量最少。以碰撞测试为例，重型发动机和低强度车身的配置是最危险的。因此，被动安全部门坚持把最大的柴油机装到敞篷车上。
- 多用途：样车曾经被认为是设计部门的象征，有些经理人确信，他们的中心主管拥有原型车的每一款模型。随着汽车公司严格控制开发成本，所有部门的试车手只能在严格规定的开发周期内共享数量少得多的样车。
- 模拟：通过提高模拟工具的准确性和可靠性来减少对实体原型车的需要。

虽然测试样车能够提供产品研发所需的数据，但是要评估计划好的生产工艺与车辆制造可行性，首先得制作出原型样车。原型样车所需零件通常由原型工装生产并在试验场所组装而不是在生产线上。与此同时，根据生产顺序评估每个零件的生产工艺。图3-9描述了样车制作的典型流程：在临时夹具上手工焊接（图3-9a），组装前测量样车零部件数据（图3-9b），采用贴近生产实际的设备来组装预装好的动力总成和悬架（图3-9c），对样车进行伪装（图3-9d）。



a)　b)　c)　d)

图 3-9　原型样车制作过程

为了准备系列化生产，在研发后期，研发活动逐步从研发中心转移到生产工厂。生产汽车所需的厂房、设备、工艺、训练有素的工人必须为量产化生产做好准备，即第一辆车从生产工厂下线。

3.3.5　投产准备阶段

投产准备阶段的主要任务是投产前的前期准备工作，包括制定生产流程链，各种生产设备到位、生产线铺设等。在试验阶段就同步进行的投产准备工作包括模具的开发和各种检具的制造。投产启动阶段需要半年左右的时间，在此期间要反复地完善冲压、焊装、涂装以及总装生产线工作机制，在确保生产流程和样车性能的条件下，开始小批量生产进一步验证产品的可靠性，确保 3 个月小批量生产产品无重大问题的情况下，才能正式启动量产。

系列开发的最后阶段是投产阶段或发布阶段，从第一辆预量产化（pre-series）车从生产线组装下线开始，到日产量达到目标产能时结束。SOP（投产日）确定预量产化生产后生产出第一辆出售给真正顾客的时间节点。

在销售方面，一个完整的发展蓝图要随之推出，并开展市场活动，如印刷预告海报，开办新闻发布会，在车展或广告中亮相。出厂阶段制造的第一辆车被送到经销商的展示厅，作为销售策略的一部分。与此同时，要培训销售和维修人员，准备展示厅和维修间并运输新车型到销售点。

发布阶段的一个里程碑是订单释放，使经销商可以跟进消费者的需求。在这一点上，管理部门必须致力于使所有预订的车辆可以准时并按 100% 质量交付。在系列开发的后期，必须要完成以下目标。

- 产品：目标协议中所有车辆的功能、特征和性能在客户的车辆上都能实现。

- 销售：做好车辆市场引进活动和售后服务工作。
- 生产：在产量和质量目标完成之后，要确认生产工艺能力系数。
- 财务：达成预定经济目标。

3.4 后续开发和产品改进

当批量生产稳定之后（意味着按照计划产量连续生产两个星期而没有重大问题），系列化开发流程正式结束。项目小组解散，任务交接到一个规模小很多的后续开发小组。

但如 1.3.1 节所述，开发活动此后一直在持续。系列开发的支持包括短期的成本和质量优化、部件废止以满足短期的法律和保险需求。后续开发包括长期计划里的所有改变。例如，在产品周期里推出小改款车型，主要包括新的设计改进和新的特征、功能选项以更新市场上的车型。

改款车型的质量、成本、重量和适应法律要求的优化措施通常在停工期间实施，更改零件和设备不会影响生产。因此，暂停生产后的车型可能会明显比之前的车好，并以车型年份区分。

第4章

汽车造型设计

汽车造型设计通常包括三方面的内容：外形设计、内饰设计和色彩设计。众所周知，汽车造型设计是不可能仅仅由大师级的人物依靠个人的力量实现的，它需要大规模有组织的集体设计团队使用高技术所支持的手段、方法来实现。其设计开发手段、方法的体系就是整体设计程序。

在现代汽车造型概念设计的发展中，很大程度要依靠开发汽车造型设计的程序及其标准化。在此我们将其中与造型设计关系相对比较紧密的部分进行概述和简要说明。汽车造型设计的工作主要是产品设计的前期工作，虽然不同的国家、不同的汽车企业在汽车设计开发过程中各有独特之处，但整个汽车造型设计开发的基本流程仍是类似的。

汽车造型不单单是一项技术工作，更是一项艺术性工作，汽车造型师不但需要掌握汽车技术、美学造型知识，同时还需要以广阔的视角来看待汽车，认识和理解汽车文化，设法把美学思想、人机工程学等运用到汽车造型中来。汽车造型的确定取决于三个基本要素，即机械工程学、人机工程学和空气动力学。机械工程学要求汽车动力性和操纵稳定性好；人机工程学要求汽车提供给驾乘人员足够的活动空间，舒适性好；空气动力学要求汽车行驶时空气阻力小。

4.1 汽车造型设计要求

潜在顾客往往是由外到里来认知一辆新车的，并且对细节的关注层面也不尽相同。顾客对车的第一印象，往往在于车的外形风格和外观的协调性。是一辆经典的敞篷跑车？还是一辆动感的双门轿车？或是一辆豪华的四门轿车？随着顾客慢慢走近汽车，汽车表面越来越清晰：发动机盖的形状，汽车车身钣金件特有的冲模线条，以及车门的形状，车门把手、前后车灯或外饰件等细节。打开行李箱盖后，顾客对汽车实用性便有了第一印象，最终进入车内，顾客对汽车的人机工程学性能有了初次体验。

在汽车内部，顾客首先会从整体协调性角度，开始观察汽车的内部空间是否宽敞？是否让人感觉空间受到限制？仪表板是否具有现代艺术气息，或只是一件普通的汽车装备？汽车座椅是真皮还是普通的线布座椅？汽车内部表面如内饰件使得顾客对于汽车价值有了初步印象。汽车内部设计细节，如控制元件、显示屏、杂物箱，会使顾客对于汽车人机工程学性能和汽车价值有更深的认识。

图 4-1 阐述了人们对整车设计认知的各个层面。从上述的认知过程可以推断出，由汽车概念设计决定的三个主要的顾客关注特性：造型风格、人机工程学性能和实用性。

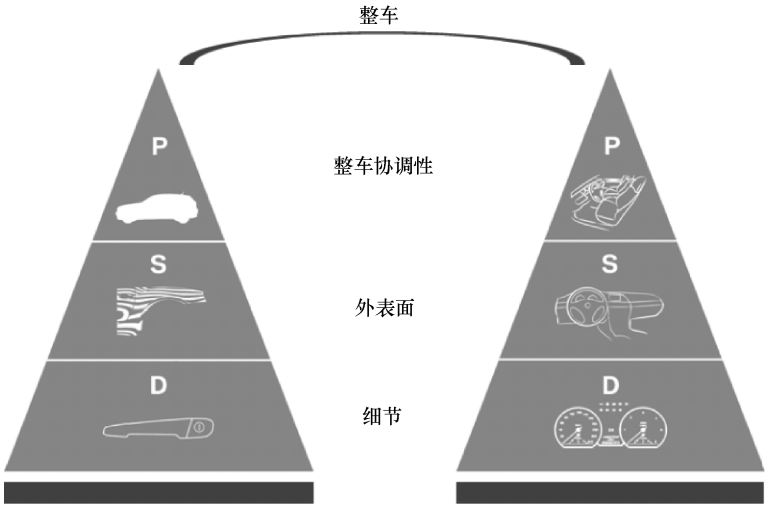


图 4-1　对整车设计认知的各个层面

4.1.1　造型风格独特

汽车造型设计风格是汽车外观的精神载体和审美表征，准确地把握和预测市场流行风格在汽车设计流程中越来越受到重视。汽车造型设计风格随着社会的变迁不断变化，而且受到各个不同方面因素共同作用和影响，其表现也是复杂多变的。

美国的 J. D. Power and Associates 公司对消费者在买车时没有选择特定车型的原因进行了调查，结果显示在消费者未选择产品的理由中，占最多的是造型风格设计，随后依次是可靠性、价格、大小、品质不良、转售价格、不够刺激、性能不够以及维修费用等。从这个调查中可以看出消费者在买车时没有选择特定产品的最大原因在于“造型风格设计”，因此那些造型风格独特的汽车在销售时往往更为有利。

如上所述，外部造型美观这个汽车第一特性，应能够吸引潜在客户的注意，引发他们的感性认知，最终驱使他们来到展示间。决定汽车外部造型的典型特征如下：外形尺寸、轴距、车轮尺寸、轮距、前后悬、发动机盖线条、风窗玻璃线条、车窗、风窗玻璃立柱、腰线、车门、驾驶室尺寸、涂装颜色等。各个品牌车辆特有的造型特征使得其与竞争对手得以区分。

从顾客和社会的观点来看，汽车造型在很大程度上体现了车主的特点。即使这个观点是不完全正确的，但是对大多数客户来说，汽车造型给人带来的信息和汽车的技术特性（如汽车性能和音响效果）一样重要，它可弱可强。图 4-2 展示了 4 辆具有独特外部造型的汽车，它们向外界传达了非常强烈的信息（尽管各不相同），例如，保时捷 911 Turbo 的动感和动力（图 4-2a），劳斯莱斯幻影的终极独创性（图 4-2b），MINI Cooper 的激情和快乐（图 4-2c），或是兰博基尼雷文顿的极端与挑衅（图 4-2d）。

20 世纪 30 年代，人们就已知道，对于汽车销量来说，汽车造型和汽车技术特性一样重要。在那之前汽车车身造型仅仅是为了技术参数如空气阻力或刚度的优化而设计的，这也导

a）保时捷911 Turbo

b）劳斯莱斯幻影

c）MINI Cooper

d）兰博基尼雷文顿

图 4-2　汽车外部造型举例

致汽车造型越来越相似。当时通用汽车公司的董事长艾尔弗雷德·斯隆认识到汽车已经从单纯的交通工具转变为一种时尚，因此，牺牲一定技术性能来获取有特色、有情感的造型是值得的。之后通用汽车公司每年都对汽车外部造型进行修改，随后在销量上超过了其竞争对手福特汽车公司。

汽车造型风格独特成为人们最为向往的，笔者认为造型风格需要注意两个方面，一个是美学原则，另一个是汽车造型的色彩设计。

1. 美学原则

美学原则既是系统性原则的内容之一，又是汽车生产企业提高市场竞争力和满足消费者的关键所在。汽车外观主体因素包括车体轮廓、车灯、车窗、轮胎、后视镜、保险杠、内饰等几大部分。无论什么款型的汽车，人们首先想到汽车外观主体美不美。这里就涉及以下一些美学原则。

1）变化与统一。变化与统一是设计中由多种形式因素按照富于变化的而又具有规律的结构组合的美学法则。现在公路上所见的汽车从整体上看，都遵循了发动机、底盘、车身等几大构成部分，丢弃哪一部分都不能算是一个完整的汽车。从美学规律上讲，这就属于所有汽车统一的方面，它表现着汽车造型的共性。“变化”的美学规律从汽车的外形上观察，汽车外形整体所含的各个部分在形式上都有区别和差异，这种差异是从整体中分离出来的一种相对的变化。汽车外形的这种变化足以表现设计美学规律中的生动和活泼的视觉感受，就如同传统轿车与跑车的外观区别。

2）比例与尺度。汽车设计遵循着美学规律的精髓，而比例关系表现在汽车造型上，更具对美学规律的说服力。美学规律中阐述和表现的比例关系，直接反映的是人们的欣赏习惯和审美爱好。汽车设计的尺度与人体工程学、美学息息相关，有特定的合理性。这也正符合了美学规律。比例与尺度在美学规律中发挥了很大的作用。

3）品位与格调。从美学角度看，它体现的是一种深层次的设计寓意和理念。品位本来就是一种美学欣赏的历程，它引导着整个设计作品的走向。在美学规律中，它不仅对美学进行诠释和表现，而且其本身就是一种美的最好的表现。品位和格调把汽车造型也表现得淋漓尽致。

2. 汽车色彩设计

色彩设计是汽车设计中的一个重要组成部分。色彩的视觉特征表明，色彩具有“先声夺人”的特征，视神经对色彩的反应最快，它给人以极深的第一印象。色彩直接影响造型的质量，甚至在某种程度上影响产品的功能与使用效果。一种好的色彩能美化车的造型，让使用者心情舒畅；若色彩不恰当，则可能破坏车的造型形象，引起使用者视觉上的疲劳、心理上的压抑，从而降低使用功效。

一款汽车的诞生，会配有多种颜色供消费者选择。消费者对汽车颜色的选择多是从美观角度来考虑。当然，颜色是车主个性的体现，能反映车主的情感和身份，比如，红色能激发欢乐情绪；黄色是崇尚大自然的颜色；蓝色表示豪华气派；白色则给人以纯洁、清新、平和的感觉；而黑色是一种矛盾的颜色，既代表保守和自尊，又代表新潮和性感；绿色则能给人带来沉静和蔼的气氛。图 4-3 是全球最受欢迎的汽车颜色的调查图。

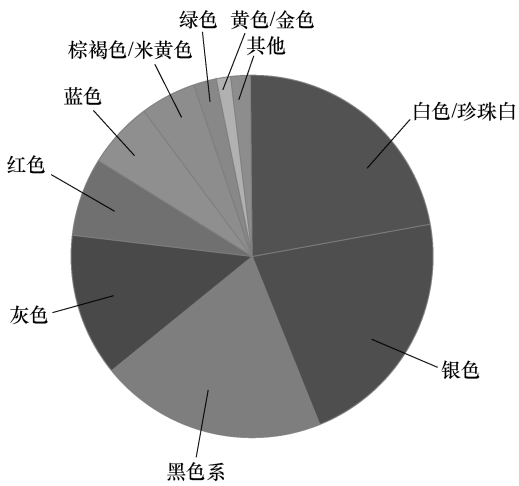


图 4-3　全球最受欢迎的汽车颜色

另外，专家通过一些专业研究，认为汽车的颜色已经不仅仅是美观和个人偏好的问题，最重要的是驾车的安全问题。近来，科学研究表明，汽车行车安全性不仅受其操作安全视线的影响，而且还受到车身颜色的能见度的影响。心理学家认为，视认性好的颜色能见度佳，因此把它们用于汽车外部以提高行车安全性。图 4-4 表示的是不同颜色汽车事故率。

外观造型是使顾客一见倾心的重要原因，而内部造型和顾客的主观价值使得顾客对车的喜爱更为持久。现在许多人在车内的时间比在起居室的时间还多，这是现在市场趋向高质量和独特汽车内饰的一个原因。例如，图 4-5 展示了四种完全不同的设计概念：宾利雅致（图 4-5a）最终限量版的豪华与舒适，宝马 Concept GS 概念车（图 4-5b）的优雅与动感，MINI Cooper S（图 4-5c）的青春与外向，莲花 Exige（图 4-5d）的简洁与动感。

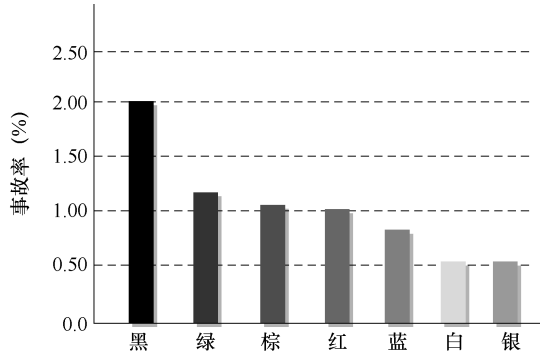


图 4-4　不同颜色汽车事故率

除了汽车内饰和外观，发动机和行李箱也独具风格。即使在打开发动机舱盖或行李箱盖时，顾客也应能体验到独具风格的汽车外观设计。

a）宾利雅致　　b）宝马Concept GS

c）MINI Cooper S　　d）莲花Exige

图 4-5　独特的仪表板样式（来源：宾利、宝马、宝马、莲花轿车）

4.1.2　体现人机工程学

2000 年 8 月，国际教育协会采纳了人机工程学这个广泛传播术语的一般定义。人机工程学（或人机工程）是研究人类和其他系统元素之间相互作用的系统学科。

汽车人机工程学设计的中心目标，是实现一个几何空间和一个人机接口，使得驾驶人和乘客在所有相关状况下安全舒适地操作汽车的各个功能，当然优先考虑驾驶人驾驶车辆的舒适性。顾客关注的人机工程学的特性如下。

- 座位：位置、可调性、可变性、座椅大小、静态和动态乘坐舒适性、脚部空间大小、安全带舒适性。
- 尺寸：腿部空间、膝部空间、臀部空间、肘部活动空间、肩部空间、头部空间、宽敞度的主观感觉。
- 驾驶操作：转向操作、踏板特性、驻车制动杆、变速杆操作、控制元件的可及性、显示屏的可见性。
- 非驾驶操作：便于进出、乘坐舒适、装卸方便、填充燃料方便、设备安装方便性（如车顶行李架，拖车）。
- 信息、通信、娱乐系统的用户界面：操作方便性、显示可读性、对车内各种信息的综合管理。

体现人机工程学的设计理念，乘坐舒适、音响悦耳、温度舒适（参见第 10 章），可减轻汽车驾驶人的疲劳感，从而提高驾驶人的警觉性和驾驶安全性。基于这个原因，许多和人机工程学有关的汽车特性被列入法律法规。

当优化汽车人机工程学性能时，需要牢记不同地域顾客的体型是不同的。具有代表性的

是，北欧地区的斯堪的纳维亚人（Scandinavian）男性身材最高大，而远东女性最矮小，这两者之间有着巨大差异。肩宽、腰围、手型、手的可及范围以及体重也有各自不同的特征。对于整车制造商来说，让世界各地顾客都能满意是一个巨大的挑战。

对于汽车人机工程学性能来说，另一个挑战是，现今人们寿命更长，驾驶人的年龄也逐渐增大。这些年长的驾驶人在易操作方面也有很高要求，同时他们也希望能完整地使用汽车的全部功能。

4.1.3 风阻系数小

汽车在行驶中由于空气阻力的作用，围绕着汽车重心同时产生纵向、侧向和垂直三个方向的空气动力量，其中，纵向空气力量是最大的空气阻力，大约占整体空气阻力的80%。空气阻力系数值是由风洞测试得出来的。由于空气阻力与空气阻力系数成正比，现代轿车为了减少空气阻力就必须要考虑降低空气阻力系数。从20世纪50年代到70年代初，轿车的空气阻力系数维持在0.4~0.6。70年代能源危机后，各国为了进一步节约能源，降低油耗，都致力于降低空气阻力系数。现在轿车的空气阻力系数一般在0.28~0.4。

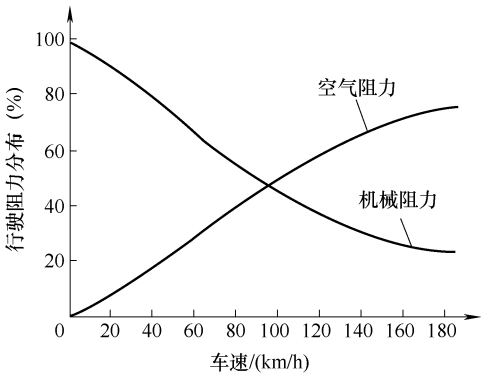
目前风阻较低的车型有马自达昂克赛拉，风阻系数仅0.27；大众凌渡：0.28。当然风阻最低的并不一定是F1赛车，如福特公司1986年推出一款叫作Probe V的概念车，空气阻力系数只有0.137（图4-6）。

图4-6 Probe V概念车（空气阻力系数为0.137）

1. 空气阻力

空气阻力（air resistance）是汽车在空气介质中行驶，汽车相对于空气运动时空气作用力在行驶方向形成的分力，空气阻力与汽车速度的平方成正比，车速越快，阻力越大。如果空气阻力占汽车行驶阻力的比率很大，则会增加汽车燃油消耗量，或严重影响汽车的动力性能（图4-7）。

在一级方程式赛车界中有这么一句话："谁控制好空气，谁就能赢得比赛！"追求最佳的空气动力是现代一级方程式赛车最重要的部分之一。在时速达300km以上的赛车世界中，空气在很大程度上决定了赛车的速度。空气动力中，要考虑的要素简而言之有两点。①减少空气阻力（drag）；②增加把赛车下压的下压力（downforce）。空气阻力越小，赛车的速度越快，下压力越大，赛车在弯道时的速度就越快。空气动力学简单说就是在某些时候这两个完全相反的力的最佳平衡。实际操作时要与环境因素造成的气流量的压强挂钩。否则无法区别什么是空气动力和空气阻力。



车速与空气阻力的关系
4门轿车；正投影面积2.04m²；
重1670kg；C_d=0.45

图4-7 车速与空气阻力的关系

2. 运动方程

通过对空气阻力积分，可以得到在空气阻力条件下的加速度、速度和位移方程。

根据空气阻力的公式：

$$F = \frac{1}{2}C\rho S v^2$$

式中，C 为空气阻力系数，该值通常是试验值，和物体的特征面积（迎风面积）、物体光滑程度和整体形状有关；ρ 为空气密度，正常的干燥空气可取 1.293g/L，特殊条件下可以实地监测；S 为物体迎风面积；v 为物体与空气的相对运动速度。

由上式可知，正常情况下空气阻力的大小与空气阻力系数及迎风面积成正比，与速度平方成正比。在空气中如果速度达到 2M 附近，由于空气的摩擦，开始出现气动加热现象。

3. 汽车阻力

汽车阻力指汽车外表面大气作用的法向压力在行驶方向的分力；根据阻力源的不同，压力阻力又分为形状阻力、干扰阻力、内循环阻力及诱导阻力。

（1）形状阻力

由车身形状的不同而产生的空气阻力（主要由作用在汽车前、后两面的压力差所致），其占空气阻力总额的 58%。

（2）干扰阻力

车身中局部突起部分（如反光镜、车门把手等）产生的空气阻力，其占空气阻力总额的 14%。

（3）内循环阻力

发动机进、排气系统，冷却系统，车身通风系统等需要和产生的空气流流经车体内部所产生的阻力，其占空气阻力总额的 12%。

（4）诱导阻力

空气升力在水平方向的投影（主要由作用在车身上、下两面的压力差所致），其占空气阻力总额的 7%。

4. 风阻系数

汽车的空气阻力系数是一种车型的重要参数。对新车型设计和车型改装来说，减少空气阻力系数，以获得良好的汽车动力性和燃料经济性，是汽车设计者的一项重要工作。

汽车在行驶中由于空气阻力的作用，围绕着汽车重心同时产生纵向、侧向和垂直三个方向的空气动力量，其中纵向空气动力量是最大的空气阻力，大约占整体空气阻力的 80%。空气阻力系数值是由风洞测试得出来的。

试验表明，空气阻力系数每降低 10%，燃油节省 7% 左右。曾有人对两种相同质量、相同尺寸，但具有不同空气阻力系数（分别是 0.44 和 0.25）的轿车进行比较，以每小时 88km 的速度行驶 100km，燃油消耗后者比前者节约了 1.7L。

一些物体的风阻系数：

垂直平面体 1.0	球体 0.5	轿车 0.28 ~ 0.4	跑车 0.25
赛车 0.15	飞禽 0.1 ~ 0.2	飞机 0.08	雨滴 0.05

5. 汽车风洞试验

在研究车身这类非流线体特性时，空气动力学试验已成为一种标准方法。风洞测试中，

可采用整车模型或比例模型进行试验，也可进行道路实车试验。通过模型试验确定设计车辆的空气动力特性，对某些设计环节或部件进行改进，完善设计。

尽管空气动力特性可根据理论方法和计算流体软件来求解相关的流体力学方程来求出，但是，由于车辆外形的复杂性，很难用数值方法计算出与实际情况相符的气动数据。因此在对符合空气动力特性的车身进行设计时，风洞试验仍十分必要。

风洞试验首先要做出车辆模型，然后安装在风洞的人工流场中，用仪器测量作用在模型上的力和力矩，以及用喷烟或气流染色或贴丝线等办法来观察模型附近流线的变化，如图 4-8 所示。

图 4-8　汽车风洞试验

虽然风洞试验的效能已被广泛承认，但因为要模拟轮胎转动，地面运动和发动机进、排气的影响，闭塞效应修正和速度修正等都很复杂，所以风洞试验方法也不是完美无缺的。

4.1.4　实用性强

另一个客户关注的汽车特性是汽车的实用性，包括存放行李和个人物品的容量与空间的实用性。顾客的典型需求如下。

- 常规装载空间：长宽高；开/关；总容积，如能存放 VDA（德国汽车工业协会）标准箱的数量。
- 标准物品的装载空间：SAE（美国汽车工程师学会）标准行李设置；自行车；高尔夫球包，滑雪板等。
- 附加装载空间：车顶行李架可用性/容量；拖车钩可用性。
- 托盘、支架等存放个人物品的部件尺寸和位置。
- 空间实用性：总体长宽高（特别是与街道、车库、拖车、火车所能承受的最大尺寸和重量有关）。

汽车实用性是一种只有在需求不能满足时，才会被感知到的汽车特性。例如，周末旅行时的行李放不进行李箱，在中央操作台上没有足够的空间放置手机和太阳镜，或者是汽车几乎停不进顾客的车库。

我们这里讨论的实用性主要是存放行李和个人物品的容量与空间的实用性，其他方面的实用性还包括合理的价格和足够的动力等。

汽车行李箱的空间大小主要取决前、后排座椅的布局以及行李箱门的设计，一般的两厢车容积是 130 ~ 290L，三厢车容积是 350 ~ 580L，越野车容积是 300 ~ 600L，后排座椅折叠后可以达到 1000L 以上。越野车对行李箱的空间要求高，所以相对来说，比普通车型要大许多，行李箱空间最小的要数跑车了，几乎不能放入太多的东西。

在汽车开发阶段，有关汽车实用性的需求是由一份私人物品清单（包括手提箱、太阳镜、运动器材等）来代表的，由此来决定车内储物空间。由于个人物品的增加，有许多不同的清单来代表不同的实用性水平。实用性水平最低的通常为双座跑车，最高的为多功能厢式货车。在设计目标协议达成阶段，每辆车都会被指定必须容纳的个人物品清单。

4.2　汽车车身造型设计

作为汽车，最主要的是能够行驶和耐用。以此为前提，汽车外观造型首先必须考虑到机械工程学的要素，包括发动机、变速器内部结构设计。要使汽车具有行驶功能，必须安装发动机、变速器、车轮、制动器、散热器等装置，而且要考虑把这些装置安装在车体的哪个部位才能使汽车更好地行驶。这些设计决定之后，可根据发动机、变速器的大小和驱动形式确定大致的车身骨架。如果是大量生产，则要强调降低成本和车身钣金件冲压加工的简易化，同时兼顾维修简便性，即使发生撞车事故后，车身也要易于修复。

其次，从人机工程学的角度，汽车是由人驾驶的，所以车身造型必须保证安全性和舒适性。首先应确保乘员的空间，保证乘坐舒适，驾驶方便，并尽量扩大驾驶人的视野。此外，还要考虑上下车方便并减少振动。

再次，从空气动力学的角度，汽车高速行驶过程中，会受到更大的空气阻力。空气阻力的大小，大致与车速的平方成比例地增加。因此，必须在车身外形上下工夫，尽量减少空气阻力。空气阻力分为由汽车横截面面积所决定的迎风阻力和由车身外形所决定的形状阻力。除空气阻力外，还有升力问题和横风不稳定问题。因此，汽车造型时必须考虑相关的空气动力学问题。

一辆新车的开发、评估以及最终决定的方式和方法，很大程度上取决于其整车制造商（OEM）。汽车外观设计的方式方法反映了在产品特性和功能上质的区别，本质上它也是特定品牌和整车制造商得以区别的主要因素。尽管创建一个通用的汽车设计流程模型十分困难，但是汽车设计的原理和过程可以被认为是众所共有的。

汽车车身造型设计是总体开发流程不可分割的一部分，可分为以下三个阶段。

4.2.1　前卫设计阶段

在前卫概念构思阶段，设计师可以抛开现实中的许多约束，展开思路，充分发挥自己的想象力进行创作，这有助于诞生新的想法和好的创意，非常有利于产品的创新性设计。经过概念发散阶段得到大致的设计方向后，从众多的设计草图中挑选出一些有发展潜力的方案进行深入探讨，包括各种造型细节、结构等都要在深入探讨阶段才能明确。

前卫概念车型的独立构思，体现了对于潜在新车型的创新性探索。受当前顾客偏爱、竞争优势分析、创新性材料和技术应用的刺激，分散在世界各地的设计工作室创作出前卫的汽车设计主题，最终应用在概念车中（图 4-9）。虽然概念车一般不会马上投入实际生产，但是在国际车展陈列时引起的大众反应，会给管理层提供有价值的意见反馈，揭示了其前卫概念构思及其功能特点是否会吸引潜在顾客。

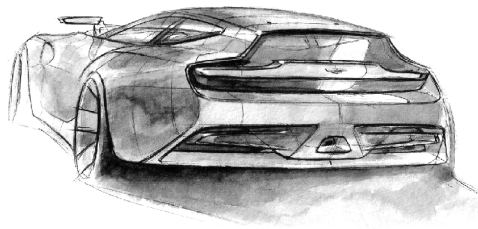


图 4-9　概念轿车外观构思

4.2.2　概念设计阶段

当汽车项目开始时，在进行前卫概念构思阶段确定的创新点和设计概念是市场需求（包括之前提到的顾客需求）和工程学的统一，以便更好地理解设计任务并最终得到一致的

汽车设计参数。在这个阶段，汽车规格参数被转化为草图，进行计算机辅助建模，包含车辆总体比例、主要部件与顾客乘坐位置的定位规划。

整车概念的主要尺寸链（如右驾驶室—右发动机支撑—发动机—左发动机支撑—左驾驶室）是由内、外部造型所决定的，并在初始阶段经过可行性检查（对比 3. 1. 1 节）。

1. 手绘效果图

设计人员会同时创建计算机辅助造型草图和手绘草图。计算机辅助造型系统的应用使得设计人员可以在短时间内开发粗糙表面几何体，并能和开发伙伴共享建模资料。

为了保证内、外部造型和安装协调，需要规定一些尺寸极限点。这些点展现了外部造型师如何控制车顶轮廓线以避免影响后排乘坐空间。

基于选定的车型比例，确认阶段的重点在于车辆的美感，特别是通过表面和设计线条来表现。在这个阶段的开始，每个设计团队通过草图和手工渲染来表达他们的设计理念，图 4-10 描述的是一辆轿车外形手绘效果图。

接着，将不同宽度的胶布沿着轮廓线贴在平板上，构成一个相同尺寸（1 ∶ 1）的胶带模型（图 4-11）。这种方法可以使新车模型的设计概念灵活改变，例如，增加额外的头部空间或者改变轮廓线的动感外观。

图 4-10　新车型外形手绘效果图

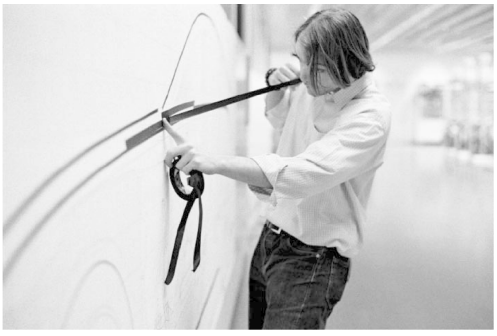


图 4-11　汽车车身胶带模型

2. 制作黏土模型

构思草图阶段有时需要一年时间。在构思草图阶段结束时，会选定一个 1 ∶ 1 的胶带模型或者 1 ∶ 2. 5 的黏土模型。由此，新车开发将根据胶带图制作一个油泥模型，将二维表达转换为三维表达。技术精湛的专家利用高精度的三维测量设备和油灰刀一丝不苟地将二维图样转换为油泥模型。覆盖上弹性金属薄片，黏土模型首次展示出真实的新车形象——外部和内部——视觉和人体工程学外观（图 4-12）。在某种程度上，计算机辅助造型模型是做不到这一点的，相同尺寸（1 ∶ 1）的油泥模型扩大了人们的感知范围，同时它也是在确信阶段设计工作的中心平台。

图 4-12　新车型 1 ∶ 2. 5 黏土模型制作过程

3. 方案选型讨论会

经过初步设计，绘制出一批彩色效果图并塑制出几个缩小比例模型，然后召开选型讨论会。这个过程同时需要直觉和系统方法，多达八个相互竞争的设计团队经过多次尝试—测试—放弃—尝试的循环，直到他们认为在形式和功能间取得完美平衡。会议的目的是从若干个造型方案中选择出一个合适的车型方案，以便作为技术设计的依据。在该阶段结束时，董事会逐步筛选，并最终选定内饰和外观模型。

4.2.3　技术设计阶段

1. 绘制胶带图

胶带图是用细窄的彩色不干胶纸带粘贴成的 1∶1（全尺寸）汽车整车图样，可表达零部件形状及外形曲线。胶带图的外形曲线数据取自选定的缩小比例模型，可用来审查整车外形曲线的全貌。如发现某条曲线不美观或不符合要求，可将胶带揭起重新粘贴，直到满意。胶带图完成后，缩小比例模型放大的曲线又经过进一步修订。

2. 绘制 1∶1 整车车身效果图

单纯由缩小比例的绘画表达汽车的外形效果尚嫌不够，还需要绘制等大尺度（全尺寸）的彩色效果图。现代造型设计非常重视等大的尺度感。缩小比例图样和全尺寸图样的真实感是截然不同的。缩小比例模型上某些圆角或曲线看上去很小巧雅致，放大 5 倍后就显得笨拙臃肿。因此，汽车形状的最后确定，不能依据缩小比例的图样或将模型直接放大，而应经过 1∶1 效果图和 1∶1 模型的修正，以符合等大的尺度感和审美要求。

3. 制作 1∶1 外部模型

1∶1 外部模型是汽车车身定型的首要依据。根据缩小比例模型的放大数据，结合胶带图和 1∶1 效果图的修订情况，就可以制造 1∶1 外部模型。这个模型是在一个带有车轮的构架上涂敷造型泥而雕塑成的。因为要用数以吨计的造型泥，并雕塑得细致、平整、光顺，所以制造一个 1∶1 外部模型的时间很长，通常需要几个星期。

4. 造型方案的审批

1∶1 外部模型、内饰模型、效果图完成后，需要交付企业最高领导审批，使汽车最终定型。汽车造型设计是促进汽车销售的重要竞争手段，大公司为了击败对手会采用频繁更换车型的手段，这对汽车造型设计的需求就十分迫切，并在整个汽车设计过程中占有越来越重要的地位。

5. 样车模型制作

样车模型制作如图 4-13 所示。

图 4-13　新车型样车模型制作

4.3 汽车内饰设计

汽车内饰（Interiors System）件具有一定的装饰性，所以业内通常翻译为“汽车内饰”。但是这部分零部件不仅只有装饰作用，它们所涉及的功能性、安全性、工程属性是非常丰富的。因此，有些整车制造商把汽车内饰系统定义成“汽车内装件系统”。

汽车内饰系统是汽车车身的重要组成部分，而且内饰系统的设计工作量占到整车造型设计工作量的60%以上，远超过汽车外形，是车身最重要的部分之一。每个整车厂通常都有一个庞大的汽车内饰团队，来完成相关的内饰设计工作。

汽车内饰件必须满足功能性、舒适性、经济性、耐久性、美观性以及具备精湛的工艺等要求。因此，汽车内饰设计时须从其功能、造型、色彩、材质以及必要的装饰件等方面进行全面的考虑。既要符合使用功能的需要，又要使内饰风格整体协调，达到赏心悦目的效果。工程分析贯穿于造型设计、装饰和色彩设计的全过程。在设计的过程中，还需要通过数字与实体模型来不断地验证和修改设计。

4.3.1 汽车内饰造型风格

内饰造型与外饰造型有很大不同。汽车内部环境与人的身心感受密切相关，大多数情况下，内饰设计应更多地体现以人为本的原则，必须以适应人的多种需求为出发点，充分考虑人机工程学、车内功能、汽车车身和内饰材料及工艺等因素，以提供一个美观、舒适、安全、便利的驾驶和乘坐环境。

汽车造型设计体现的是整体风格，而装饰和色彩设计体现的是细节与品位，并衬托出内饰的格调。例如，豪华轿车如凯迪拉克等车型追求的是真材实料，其内饰件没有人造革、水转印（Hydragraphics），取而代之的是真皮和实木；相对于中高级轿车单一的内饰颜色，经济型轿车讲究以丰富多变的明快色彩和外观变化来体现年轻与活力。

4.3.2 汽车内饰设计内容

汽车内饰主要包括以下子系统：仪表板系统、副仪表板系统、门内护板系统、顶篷系统、座椅系统、立柱护板系统、其余驾驶室内装件系统、驾驶室空气循环系统、行李箱内装件系统、发动机舱内装件系统、地毯、安全带、安全气囊、转向盘，以及车内照明、车内声学系统等。

汽车内饰和色彩设计的主要内容是内饰的颜色、光泽、材质、纹理和外观装饰等。外观装饰有水转印、模内装饰（In Mold Decoration，IMD）等。按照内饰零件表面装饰的特点，装饰设计可分为硬装饰和软装饰两部分。硬装饰包括皮纹、木纹、电镀和油漆等；而软装饰则包括面料、人造革、真皮、地毯、织带和网兜等。

图4-14 汽车内饰造型模型

图4-14展示了轿车仪表台内饰设计的不同实现层次。1∶1内饰模型用以审视汽车内部造型效

果和检验汽车内部尺寸。1∶1 内饰模型与 1∶1 车身外形模型同时制作，其设计和尺寸相互配合。1∶1 内部模型的形状、色彩、覆盖饰物的质感和纹理都应制造得十分逼真，使人具有置身于真车室内的感觉。

4.3.3　汽车内饰色彩与纹理设计

汽车内饰的色彩纹理，无疑是最能体现消费者文化内涵的代表，是消费者“情绪价值”的体现。另外，中国消费者购车的考虑更加理性，除了关注汽车外观造型设计的变化，越来越看重内饰带来的舒适感和美观性。内饰的纹理和色彩设计是提高其舒适感与美观性的关键。造型设计体现的是整体风格，而装饰和色彩设计体现的是细节与品位并烘托出内饰的格调。

通过内饰的优美造型、优良选材、精工制作可以提高整车的档次，提高车型竞争力。因此建立一套规范的内饰色彩、纹理设计流程可以帮助企业更有效地完成汽车造型设计，提高产品设计的一次性成功率，从而缩短产品开发周期，降低生产成本，提高产品质量，给企业带来更多的商机。

内饰的色彩纹理是指包括仪表台、门内饰板、座椅、ABC 柱、顶篷、地毯、后围和后置物板以及与其相关的功能键和装饰件等汽车内装件构成的汽车内部空间的色彩纹理。这些内饰件的色彩和纹理直接影响人的视觉以及触觉感官，“就像一件样式新颖、剪裁合体的衣服，要有魅力的颜色与花样来提升，以满足不同人的需要”。

需要特别提出的是，本书提到的内饰色彩纹理，包括内饰的色彩、皮纹、面料。皮纹主要是指内饰塑料件上经过腐蚀等工艺形成的皮纹效果，内饰面料主要是指运用在座椅、门内饰板、顶篷、地毯等部分的皮革以及织物。

内饰的色彩和纹理设计的内容主要包括四个方面：一是标杆车色彩纹理采样分析，即对标杆车色彩纹理品质进行检测分析；二是前期市场调研和趋势分析，即对当前的流行趋势进行趋势分析报告；三是色彩和纹理设计，即对内饰方案的整体和局部细节进行色彩纹理设计方案的构思与实施；四是色彩纹理样件品质控制，即在样件试制阶段对不同供应商提供的样件组合在一起所呈现的色彩纹理的统一性进行控制。

一个完整的汽车造型设计开发从项目立项到最终模型结束提交 A 面，将会耗费一年多的时间，而色彩、纹理设计伴随其中，并延续到后期的样车试制阶段。从最初的标杆车色彩纹理品质检测分析，到前期的汽车造型趋势分析定位，并在内饰效果图冻结后在冻结效果图上进行色彩纹理设计，在汽车造型设计模型阶段辅助模型进行色彩纹理的表达（图 4-14）。

内饰油泥模型是色彩纹理效果从二维图样表现到实物的一个阶段。色彩和面料可以得到初步的直观展示，但皮纹效果是无法准确表现的，只有极少部分具有特别丰富经验和创意手段的油泥模型师能通过特殊的创意手段制作出随机的皮纹效果，以达到提升整车模型视觉效果的目的。

4.4　汽车造型设计验证

如上所述，设计验证是设计流程的一个主要部分，同时在不同阶段会采用不同的工具和方法。

4.4.1 造型风格验证

在造型风格验证期间和定性决策环节，内饰和外观造型可以使用 CAS 模型、可视化 1∶1 投影图或者虚拟现实环境进行验证。表面的平滑度和协调性可以通过计算机辅助工具来校验（图 4-15）。

效果图所表现的表面、材料和材质使得我们不需要价格昂贵的原型车也能逼真地感受到汽车内、外部的设计面貌。图 4-16 展示了宝马 Concept CS 逼真的外部效果图。

图 4-15 基于虚拟表面模型的表面评估

图 4-16 逼真的外部效果图

最终做出关于内、外部设计的重大决定，需要依赖 1∶1 模型。只有真实的硬件才能让我们多方位地验证汽车的比例、表面、颜色、气味、触感以及感受等。在这个优化和选择过程所使用的 1∶1 模型数量直接影响最终设计的质量。

由于造型对其他整车特性有很大的影响，例如，车体表面的可制造性影响制造成本，空气阻力影响声学特性，悬架空间影响乘坐舒适性，汽车造型在设计师和工程师的合作中进行。

4.4.2 人机工程学验证

人机工程学的基本标准（如使未来所有用户具有健康、有效的姿势）需要注意并尽可能早地在设计流程中进行验证，以避免后期昂贵的更改。与汽车造型不同，人机工程学性能可以在设计早期进行完全评估。高级仿真工具如 RAMSIS 或 SAMMIE CAD 可以使用虚拟车和虚拟人准确地调查驾驶人与乘客的人体工程学性能。图 4-17 展示了驾驶人人体工程学的虚拟评估。

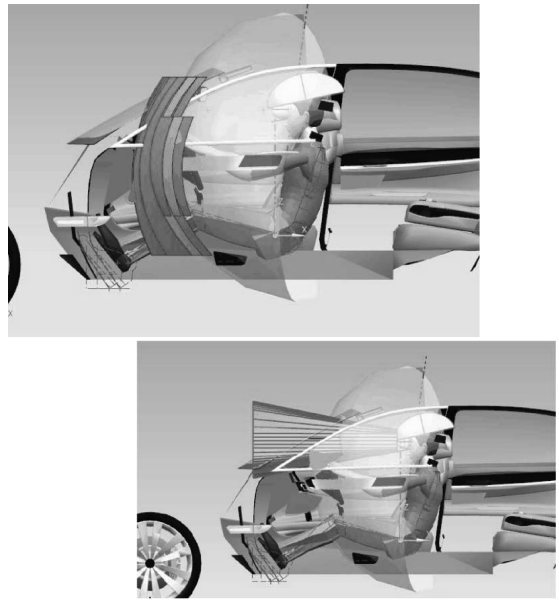


图 4-17 人体工程学的虚拟评估

由于汽车人机工程学很大程度上取决于个人体征，进行验证时，必须包括各类具有代表性的未来用户。一种方法是调整实验，20～30 人在驾驶实验中会对座椅位置、显示器位置以及控制元件进行评估。评估人体工

程学性能的一个常用方法是寄送调查问卷给购车数周后的车主，这种方法可以获得最多的顾客资料，为未来设计项目做准备。

4.4.3　储物实用性评估

为了保证车辆能够提供必需的空间来存储个人物品，同时要方便驾驶人和乘客拿取，虚拟物品将会放置在虚拟车中（对比 4.1 节）。整套虚拟个人物品在图 4-18 中展示。

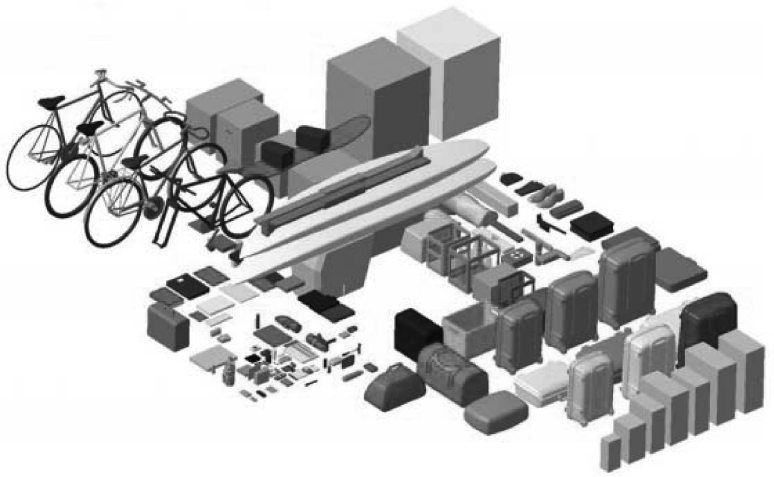
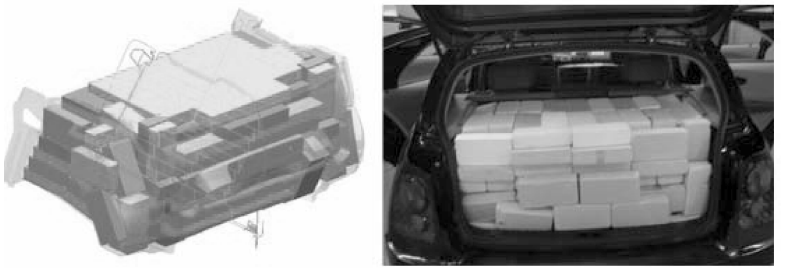


图 4-18　虚拟化的个人物品

虚拟验证能够基本保证储存必需的物品，但是非刚性物品如高尔夫球包只能用硬件表示各自的储存空间。由于这些要求能决定概念临界尺寸（如行李箱开启的最大宽度），应尽早确认。为此，图 4-18 中的概念模型被用来表示储存空间和临界边界（如行李箱的橡胶密封圈）。基于概念 CAD 资料，这些概念模型可以低成本地快速制作，来真实评估人体工程学性能和储存空间。

图 4-19 展示了基于德国汽车工业协会 210 号指令的标准行李箱容积验证的模拟（图 4-19a）和真实情况（图 4-19b）。



a)　　b)

图 4-19　真实行李箱容积实用性评估

第5章

虚拟样车流程

5.1 虚拟样车建模

5.1.1 虚拟样车技术简介

产品与流程的虚拟现实是在过去20年中汽车研发领域取得最瞩目发展的一个领域。最早三维绘制软件协助设计师生成零部件的几何体——通常还会被重新转化为平面零件图。久而久之，通过增加更多的几何信息（如一个零件在某一工作空间内的位置，以及它的表面性质等）、管理信息［如零件编号、物料清单（BOM）结构、版本、改款与配置等］以及性能特性（如材料信息、强度、颜色等），三维零件构成虚拟整车的这一过程，成为车辆协作研发过程的核心交流平台。

虚拟样车是所有共享工作平台的所有具体汽车零部件的代表，这些零件能够使得在整车集成的同时协调地开发。除了作为当前设计开发的一个交流平台，虚拟样车更是模拟与评估车辆特性、功能、成本和质量的基础。虚拟样车能够有效地建模汽车零件并且通过提高零件之间几何尺寸的一致性与组装过程的预判性，更好地组装这些零件，同时大大减少了昂贵的零部件和制造装备的费用。虚拟样车以空前的程度替代了实际原型车。然而在被动安全的测试中，仍需要实车碰撞试验得出的结果来验证通过虚拟样车模拟出来的结果（见11.2.2节）。

虚拟样车的作用不是阻断技术人员间的交流，而是更加强了交流的需求。一名底盘工程师花了几个星期设计了后车桥架，现在想在共用工作空间内继续改进它，他或许会发现之前作为参考依据的车壳尺寸已经改变了，这使得他的设计完全没有了适用性。在虚拟样车设计平台中的同事需要不断进行沟通以尽可能地实现协作设计。

5.1.2 虚拟样车信息技术系统平台

虚拟样车的协作开发与分析需要一套兼容的、至少部分标准化的信息技术系统环境（图5-1）。

- 三维计算机辅助软件如CATIA、Pro/ENGINEER、NX或SolidWorks被用于创建汽车零件的三维模型。就像车身上几乎所有可见的表面都必须满足非常高的审美要求并且可能首先会制作成油泥模型（见4.2.2节）一样，汽车设计所使用的计算机辅助设计系统中自由曲面的建模是最重要的功能。得益于在自由曲面绘制这一领域中的强势，CATIA在汽车行业中成为近乎标准的设计软件。Pro/ENGINEER更多被应用于发动机设计，对发动机主要的表面进行分析而不是自由造型，由此，Pro/ENGINEER参数化设计的优势可得到完全彰显。例如，当将直列四缸与直列六缸发动机设计合并为同一系列的时候。汽车三维计算机辅助设

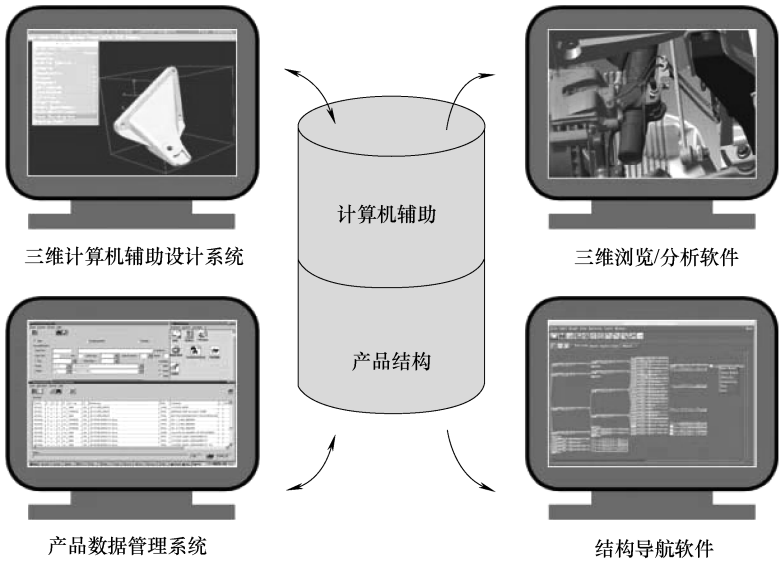


图 5-1　虚拟样车构建必要的信息技术环境

计系统的其他相关功能包括高级曲面造型、高级实体造型、处理大型装配件。在早期的三维计算机辅助设计系统中，设计师需要选择和修改基本几何形状或曲面来绘制零件几何尺寸，如今他们可以使用面向特征的建模方式根据设计意图来设计零件。例如，一个镗孔式样或一个密封圈的槽。同样，目前的三维计算机辅助设计系统可提供特定的工具来创建如线束、管道与导管等模型。

- 产品数据管理（Product Data Managemet，PDM）系统负责管理和追踪所有几何性与非几何性（如产品编号、描述、成本、材料、技术图纸等）产品信息的创新或改动，并将这些数据链接到各自的三维模型上。为了存储和检索这些数据，PDM 系统操作着一个产品数据库。PDM 系统管理不同的配置、版本和产品的改款。由此，PDM 系统是管理构建和维护虚拟样车的工具，如创建一个虚拟材料清单，即按等级划分虚拟样车结构。为使产品结构可视化，使之在特定研究情况下选择零件变得更加容易（例如，使所有内部零件可视化或规定一部分范围内的零件可视化），PDM 系统中的用户界面是一个结构数导航（图 5-1）。

- 相比 CAD 系统更关注单个零件细节上的创新和改动，三维可视软件让用户实现更大的装配部件甚至是一辆整车的装配。典型的操作有移动、旋转和缩放，可视化软件需要简化可区分部分的零件模型，以此减少操作所需的计算量。为了达到这样的目的，将封装的模型完全嵌合到每一个零件中，并由 PDM 系统将其相互链接。借由最新技术的可视化软件，一辆完整的虚拟样车可被实时观察和移动，当然这取决于计算机的图形表现能力。可视化软件提供的附加功能包括截面或非截面的漫游查看、运动学模拟和距离检测（见 5.2.2 节）。

对于更高级的功能测试评价（如碰撞性能或车厢温度场），会使用专门的模拟分析虚拟样车的几何和非几何数据。整车性能特征的模拟将会在第 8 章和第 9 章中进行详细讨论。

5.1.3　车型技术参数

从概念设计阶段开始，虚拟样车就与整车设计共享工作平台。在整车集成过程中，车辆仿真团队对虚拟样车车身形式、国别版本、发动机、变速器和选配项做出详细说明。由于构

建与维护工作的需要，虚拟样车技术参数配置的核心工作是寻求尽可能少的车辆配置方式（详见 3.3.3 节），又能根据开发工作的需要及时方便地获得整套车型系列数据。图 5-2 展示了一组虚拟样车的细分结构树。

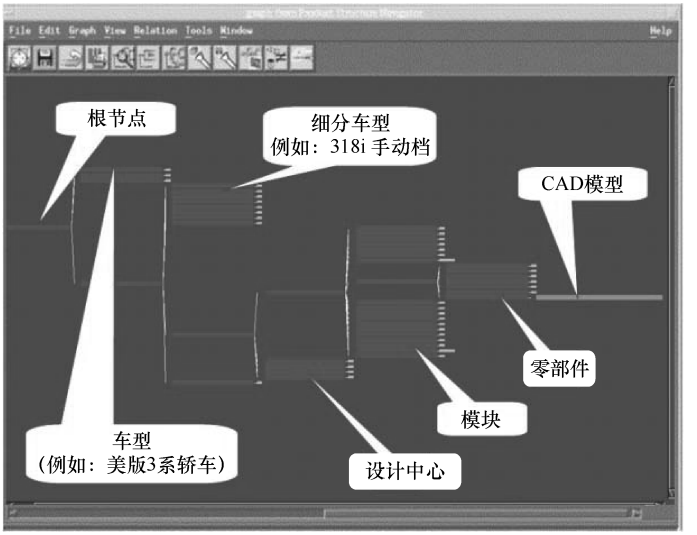


图 5-2　细分的虚拟样车结构树（来源：宝马）

5.1.4　零件 CAD 建模

作为虚拟样车的起点，车辆仿真团队为每辆虚拟样车提供了结构环境和共享的工作空间。之后，几何数据一步步地由设计中心添加进来并进行定位。在概念设计阶段开始，当新车概念被创建出来时，有关汽车部件都是以简单而基本的几何形状来表征的（如立方体、棱柱体等）。之后虚拟样车才成为设计与分析工作的基础。

在系列开发阶段中，每个单一零件都根据它的几何与功能需要进行单独建模。在整个产品开发过程中，虚拟样车不断发展并且变得越来越成熟，直至它们的零部件达到可以开展系列化生产的程度。图 5-3 描述的是一辆用于系列化研发的虚拟样车详图。

图 5-3　虚拟样车模型

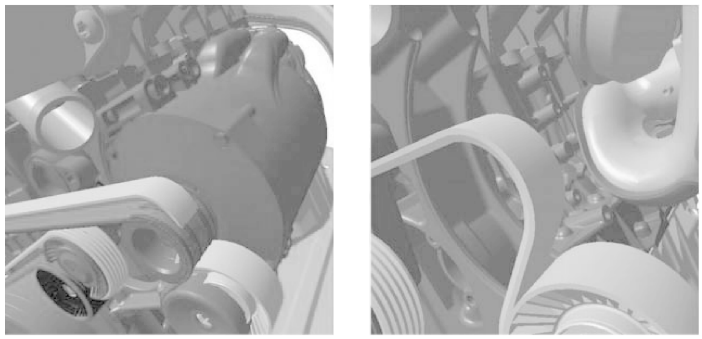
5.2　整车几何集成

“几何集成”表示的是确保在整个汽车开发流程中虚拟样车的几何连贯性，从而避免干涉，确保规定的功能间隙。

5.2.1　空间干涉检测

在发布新版本虚拟样车之前，如果两个设计师只是各自独立地检查他们所负责部分的零件设计变更，或者一位设计师在发布他的新版本之前没有检查他设计的零件环境，那么这两个有变更的零件就可能发生空间干涉。在提供高度同步数据的虚拟样车并行工程中，虚拟零部件可能会发生空间冲突或干涉，因此必须通过几何集成来消除空间冲突或干涉，以确保车辆的可实现性。

在系列开发阶段中，开始几何学分析之前，需要验证 CAD 模型的品质与可用性：模型是否完整？模型的定位是否正确？模型是否为最新版的？图 5-4 显示的是两种发生几何冲突的虚拟带驱动的场景：一种是缺少驱动轮，另一种是有一条多余的废弃传动带。



a)　　b)

图 5-4　多余的废弃传动带和缺少驱动轮（来源：宝马）

当存在问题的虚拟样车被更新为最新版时，可用三维（3D）浏览器自动地检测冲突。被识别有冲突的那些零件会传送到负责解决零部件冲突的设计师，以便他们可以评估空间干涉的危险性。图 5-5 显示的是一张自动生成的冲突表。左边两列详细说明了空间干涉的零部

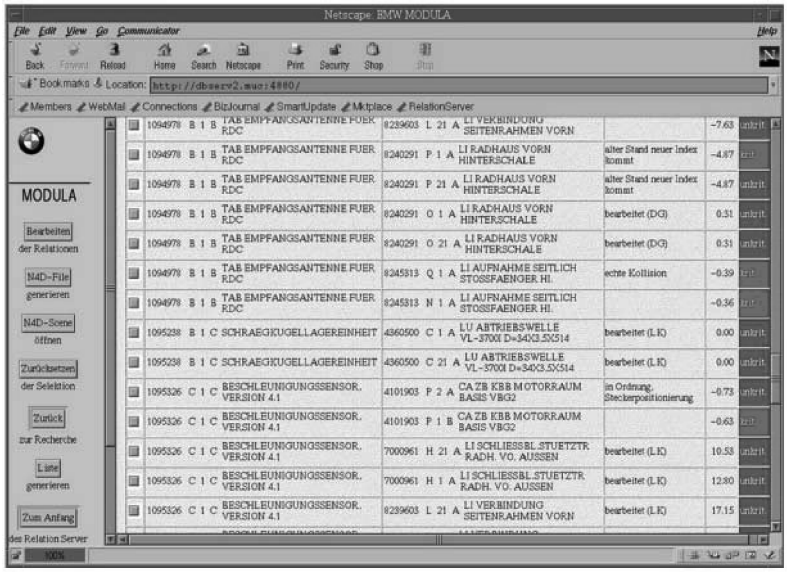


图 5-5　自动检查冲突结果（来源：宝马）

件，右栏用红色或绿色指明危险程度，其中绿色表示安装正常，而红色表示发生了空间干涉。

如图 5-6 所示，在虚拟零部件中检测到的空间干涉临界条件清晰可见。

a) b) c)

图 5-6 冲突：安全、较危险、危险（来源：宝马）

- 图 5-6a 的空间干涉是不危险的。检测到的橡胶软管与支架之间空间干涉，现实中是固定在软管的弹性材料。另外一个不属于危险的空间干涉典型例子是发生在车门的密封圈与车体侧框架之间的干涉。在计算机软件造型时，这些密封圈是预装在与车门相关的位置，而当造型装配时，这些密封圈自然而然就会与车体的框架模型发生空间干涉，这是因为虚拟的密封圈不会像真正的密封圈一样可以变形。
- 图 5-6b 显示的是源于尾灯的螺栓与主体各自的螺栓孔装配不匹配的冲突。因为在零部件发布之前，这些空间干涉必须被更改，而更改只需要相对较少的精力：在三维 CAD 建模中，这些螺纹孔可以轻易地改变。在系列生产阶段，当某个零部件的几何尺寸改变而相邻部件的尺寸却没有相应地改变时，这种装配不匹配的空间干涉就会频繁发生。
- 图 5-6c 显示的是相当危险的，这种刚性部件之间的空间干涉，需要大幅度修改相关设计图。而在系列研发阶段，这种类型的空间干涉，经常来自于某个零部件设计更改时，没有同步更新到整车装配图中。

许多设计者认为自动检查空间干涉是检测和发布设计小故障的一种手段，甚至他们可以从定期的冲突报告中受到启发。在产品设计阶段，他们把空间干涉当作是正常的、中间的状态。因此，“等着我下个版本的零部件”被当作解决空间干涉的典型措施。但是，由于每一个设计者都能够在任何时候更新其零部件，很可能出现这种情况：新版本的零部件的确可以除去列出来的空间干涉，而在除去原来空间干涉的同时，也会在虚拟样车的其他地方产生新的空间干涉。对全局设计而言，自动检查空间干涉是必不可少的，它是整车同步开发的基础。

5.2.2 功能间隙检查

“功能空隙”指的是两个零部件之间的最小距离，以确保合适的功能性。最小间隙可以避免热传递（如排气管与隔热罩之间），可以允许运动部件在各个自由度的无碰撞运动（如前轮在车身轮罩内的运动）或者给予充分的振荡间隙（如发动机受到驱动力矩作用时的微量反转）。虽然虚拟零部件之间的干涉可以通过干涉检查工具等手段轻松地检测出来，但是确保功能间隙却是需要手动检测的。三维观察仪常用来测量两个零部件之间的最小距离。在

图 5-7 中，发动机支架与下面的冷凝管之间的最小距离为 7.5mm。

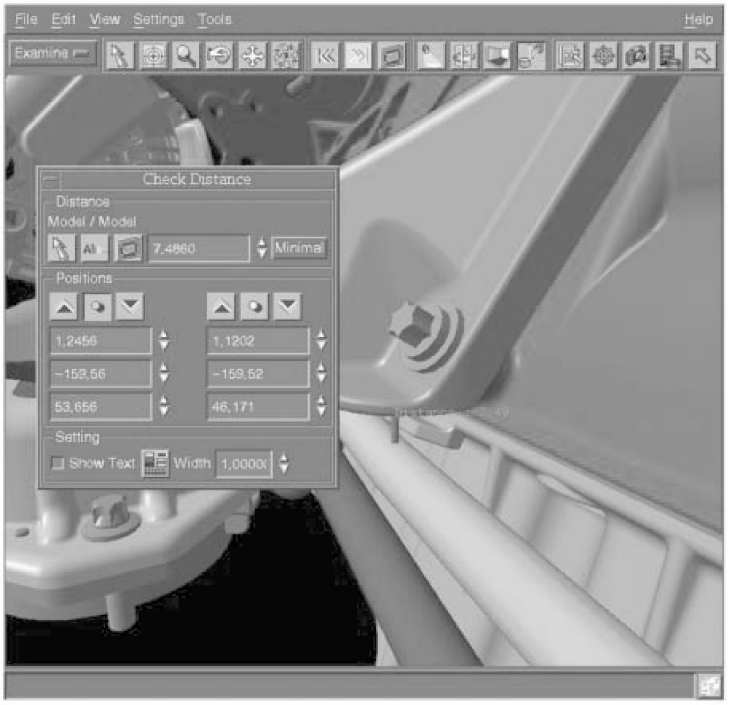


图 5-7　零部件之间的空隙分析（来源：宝马）

留多少间隙，是由相关专家来规定的。间隙库可以提供最初的推荐值。但是由于很多参数会影响所需要的距离，可靠值必须由专业团队来计算或者评估。例如，随着发动机末端和车身末端相对运动，在加热软管与发动机之间存在临界距离，软管的弹性又取决于冷却液的温度和流动率，同时，在汽车的操纵过程中还会引起软管的振荡。

5.3　深层次功能几何评估

5.3.1　行李箱储物空间

为了确保在座舱和行李箱中储存个人物品的最佳实用性，这些物品以 3D 模型呈现并加入虚拟样车中。包括虚拟载荷的几何集成流程，将底盘、座舱和行李箱的尺寸及可成形性作为一个整体，在产品开发流程的早期阶段进行验证。

5.3.2　车辆运动学评估

另一个几何集成流程的先进应用是汽车运动学的验证。

- 操作动作，比如，在任意位置的换档（在杯架中的不同种类的瓶子和烟灰缸盖子的开或关）或简单的车门、车顶和行李箱盖的移动。
- 功能操作，如底盘、悬架和轮胎的振动和回弹，转向部件和前轮的回正，或车窗的

升降。

用于检测这些运动间隙的一种有效的方法，是沿着运动的轨迹扫描零件外形的包络线并检测包络线是否符合汽车的几何外形。这种方法的一种重要应用就是创建车轮外形的包络线（图 5-8），这个包络线可以代表讨论中所有汽车轮胎的最大几何膨胀外形。

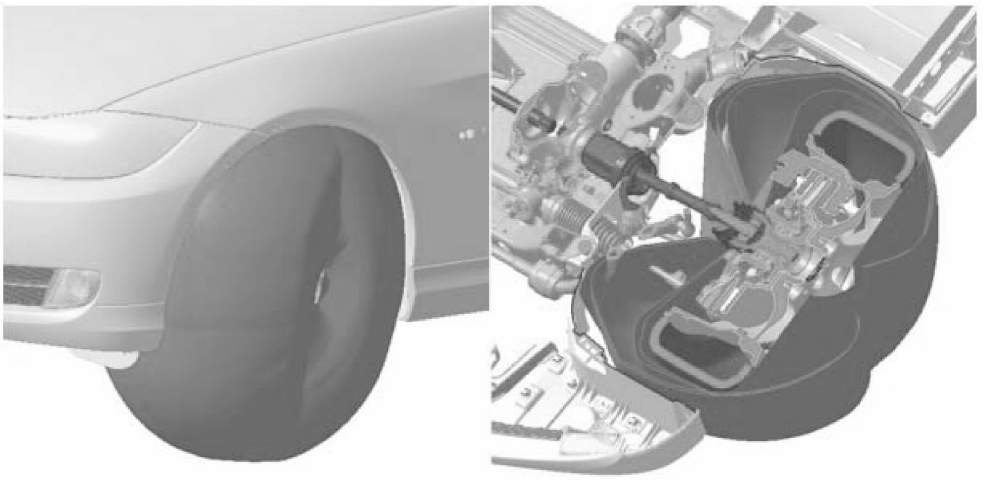


图 5-8　用于概念评估的车身轮罩（来源：宝马）

车轮包络线的计算必须考虑到以下的参数：

- 悬架运动学所允许的最大车轮跳动与回弹；
- 转向运动学所允许的最大转向和倾斜；
- 轮胎对应纵向、横向和侧向力的最大弹性变形量；
- 汽车防滑链的最大松紧程度；
- 轮胎能承受的最大和最小的气压；
- 轮胎的耐磨损情况。

检查车身轮罩包络线与其他一些部件如制动油管，ABS 传感器电线，或驻车制动拉索之间的间隙。但由于前轮包络线在决定概念车型的几何外形上有着特殊的相关性：在概念设计阶段中，前轮包络线决定了发动机支架的最大外部限制，由于发动机和发动机支架梁的宽度已经确定了，总的汽车宽度也就确定了（可与 3.1.1 节比较）。

几何体复杂的运动学评估，如伸缩式硬顶的评估，是不可能采用这种准动态的包络线的方法的。它需要一个先进的多刚体模拟系统，可以分析连接在一起的零件的运动学，这些零件是通过能够约束零件相对运动的关节功能连接在一起的。

5.4　虚拟样车模型版本

对于典型的汽车开发项目，先要确定项目的节拍点，并及时在各个关键节点对整车进行阶段性验证。以前这都是由硬件建模小组来做的，而现在只需要虚拟制造团队创建一张完备的汽车综合图就行了。虚拟制造团队可由三个主要的阶段构成：

1）在计划阶段，汽车特性必须通过验证。根据这些预期的结果，由制造团队的说明书来规定所要求的虚拟样车。通常，制造团队的虚拟样车是现有的虚拟样车复制版。

2）在设计阶段，就是把设计内容落实，虚拟样车团队反复地检测虚拟样车的几何顺从性（几何集成）。评估几何问题并反馈到问题管理流程中，用来监控团队的解决方案。在设计阶段最后结束的时候，CAD 和 CAE 数据基本一致：完整、正确并无冲突。公布虚拟样车的几何外形，并做好相关测试准备工作。

3）在评估阶段，功能集成和生产集成通过采用合适的模拟工具和方法测试虚拟样车的功能和可制造性。最终，虚拟制造团队将研究结果上报给管理部门以正式地验证项目的各种情况。

虚拟制造团队的前两个阶段是为了在订购原型工艺装备和零件之前，确保硬件原型的 CAD 数据的完整性。

第6章

汽车电子电器系统架构

6.1 概述

从1886年汽车问世到20世纪末，汽车是由纯粹的机械零部件组成的，传统的汽车开发流程，经过几十年的运作和完善，高效地开发了一个又一个深受客户喜爱的经典车型，也出现了许多在汽车的质量和可靠性方面享有国际盛誉的整车制造商。

但是从21世纪初期开始，汽车已经由单纯的机械转变为由电子/电器系统组成的综合系统。一些整车制造商争相推出了拥有最新电子功能的豪华汽车。然而，其中的一部分汽车出现了随机且难以预料的电子故障，这令消费者和制造商感到十分吃惊与焦虑。

如今，新款汽车中几乎所有功能都是由电子系统互连和控制的，随着设计变量的增加，整个汽车电子电器系统的复杂程度急剧增加，以致传统的汽车开发流程都无法应对。以下数据有力地阐明了这种质的转变：

- 汽车拥有多达2500个软件控制功能，包含1000万行软件代码；
- 这些功能通过多达80个电子控制单元（ECU）来实现，这些ECU之间有多达5种系统总线通信方式；
- 高达40%的汽车成本取决于电子设备和软件；
- 90%的创新来自电子设备和软件；
- 电子控制单元（ECU）50%～70%的开发成本与软件相关。

将来，不同整车制造商开发的汽车电子电器系统硬件（电子控制单元、传感器等）、操作系统软件和界面（见6.5.1节）都将会越来越标准化。不同汽车品牌和整车制造商的区别将主要在于应用软件所有权的不同。

简而言之，汽车电子系统的功能是通过执行机构来实现的，即根据传感器或使用者的输入信号，在电子控制单元的嵌入式软件控制下，实现移动、加热、照明或者显示等功能。因此，一个完整的汽车电子/电器系统是由以下携带强弱电信号的电子元器件组成的：

- 传感器（如车轮转速传感器）；
- 输入设备（如按钮、旋钮）；
- 嵌入控制软件的电子控制单元；
- 执行机构（如电动机、照明设备、电热元件）；
- 显示器和扬声器；
- 传递数据和供电的线束（电缆和接插件）；
- 蓄电池；
- 直流发电机/交流发电机。

在这些汽车电子元器件中，嵌入式软件扮演着越来越重要的角色。如今，一个电子控制单元中高达70%的成本是与软件相关的，如新款宝马7 系轿车的核心电控单元包含400 万行软件代码。

图 6-1 以 2009 款宝马 7 系轿车为例，以此说明现代汽车电子系统的复杂性。汽车电子电器系统可以根据相关功能分成若干群集，即所谓的汽车域（结构域），在汽车工业中广泛应用的结构域如下。

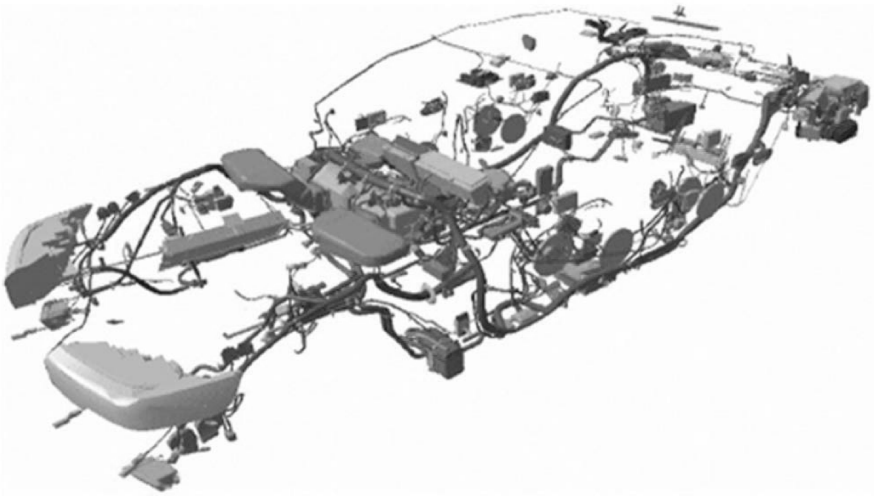


图 6-1　汽车电子电器系统

- 信息娱乐：面向信息、娱乐和通信的功能（如仪表板、音频系统、收音机、影像模块、导航系统、电话等），包括中央人机交互界面（HMI）（参照 13. 1 节）。
- 车身电子系统：是汽车核心功能模块，如准入管理系统和防盗设备（参照 12. 2 节）、车窗、后车门、座椅和刮水器的驱动装置，或是车舱空调管理单元（参照 10. 4 节）。
- 底盘和驾驶人辅助设备：保证汽车安全行驶的功能，如 ABS（防抱死制动系统）、ESP（车身电子稳定系统）、ASC（自动稳定控制）和 DSC（动态稳定控制）（参照11. 3 节）。
- 动力传动系统：控制动力产生和转换成驱动力的所有功能，包括发动机电子控制单元、档位控制、燃油泵和车载诊断单元等。
- 被动安全系统：碰撞检测和避免损伤的功能单元，如安全带预紧装置、安全气囊和弹出式防滚架等（参照 11. 4 节）。

属于同一个结构域的电子元器件共用一个总线系统来交换数据。理想的情况是，电子电器系统开发的结构域（organizational structure）从属于技术域（technical domain structure）。尽管在某些情况下，结构域也代表组织结构。

一个子系统包含了用于实现一个或多个特定功能的所有电子元器件，其范围相差很大，从只包含几个电子元器件到几乎涵盖整个系统。图 6-2 展示了汽车准入控制子系统的电子元器件种类。

与数据网络一样，汽车电子电器系统也需要一个电网来为所有电力负载提供所需的 12V 标准直流电压（点火装置和电驱动起动机除外）。

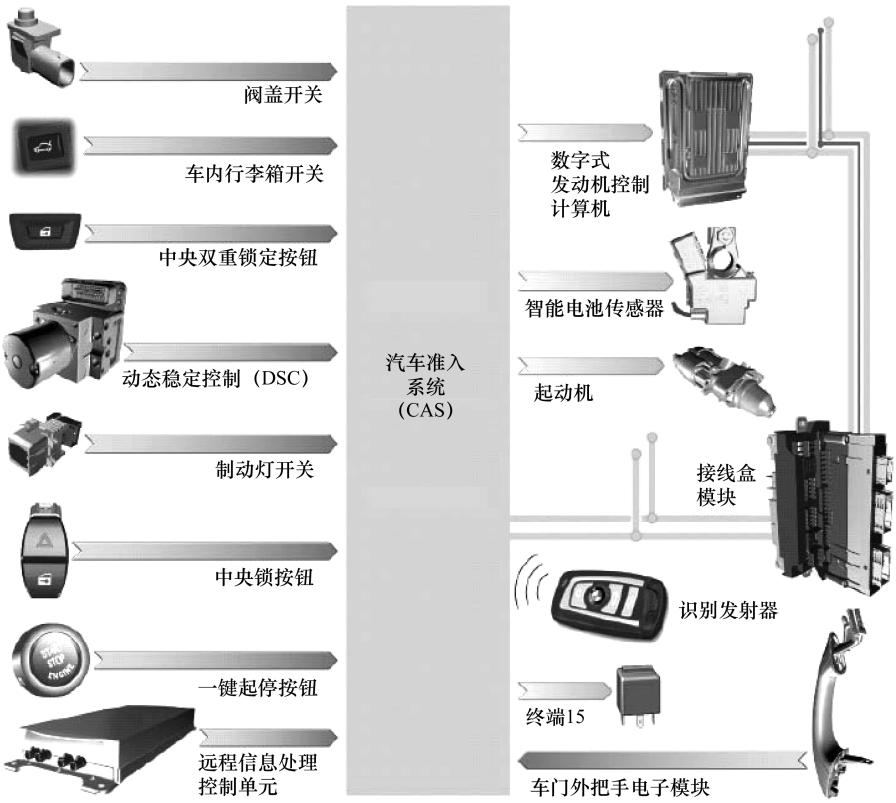


图 6-2　汽车准入控制子系统部件

6.2　系统开发管理

6.2.1　文化冲突

当我们思考为什么前述汽车电子系统会遭遇上述质量问题时，有些人认为，最主要的原因是整车开发流程没有和产品复杂性增长保持同步，其实是“旧经济”和“新经济”之间的文化冲突。

毫无疑问，当今的汽车开发植根于传统工程领域，同时汽车研发中心的主流文化被那些所谓的“汽车业内人士”所控制，绝大多数都有机械、电器和控制领域的专业背景，由他们的想法来决定应该如何进行产品开发。但是近十多年来，汽车电子控制技术的快速发展，另一类 IT 专家（计算机专家和软件工程师）几乎毫无征兆地加入到了汽车研发队伍，他们大多没有汽车行业背景，甚至没有工程背景。除了穿着和生活方式相同，这些 IT 专家与传统“汽车业内人士”存在沟通障碍，因为他们对汽车开发有着不同的想法以及要求，对产品开发、整车集成、质量和可靠性也有不同的见解（见 16.1 节）。

这种不同的见解在著名的微软总裁和通用总裁的虚构辩论中有着完美的阐述。在那次辩论中，微软总裁抱怨汽车开发效能与产品更新速度不及软件开发，作为回击，通用总裁假设

当汽车的质量和可靠性只达到微软软件同样的标准时，汽车车主将会遭遇怎样恐怖的情景。当工程师开发底盘和车身部件时，他们通常要通过复杂的集成流程与反复验证来确保整车的几何与功能协调性，若为了修复或提升某些功能而擅自更改程序，将会导致其他部位出现难以预计的功能故障，并在整车集成层面出现永无止境的挑战。而软件工程师则在工作时更独立一些，并且他们对整个系统的功能集成不需要太严谨的流程。

6.2.2　系统开发管理

除此之外，整车制造商运用系统工程的理论与方法来开发可靠的汽车电子系统，并将其作为新产品开发流程的一部分。国际系统工程协会（INCOSE）将系统工程定义为一种跨学科的方法，在考虑相关问题的各个方面时，要尽早关注顾客要求、记录需求、设计综合和系统验证，来成功地开发系统。图 6-3 的 V 模型系统管理图列出了系统工程流程中的主要环节，这些内容将在随后章节中进行详细讨论。

图 6-3　系统管理 V 模型

6.3　顾客需求挖掘

系统开发项目为何失败？一些相关研究发现，最主要的原因是不能清晰阐明顾客的需求。对需求进行有组织的收集和分析研究，以及在项目过程中不断更新客户需求的管理流程，是保障系统开发成功的一个必不可少的基本前提。需求工程可分为四个步骤：需求启发、需求分析、需求表达和验证。

6.3.1　需求启发

需求启发作为启发过程的一个基本原则，它必须确保所有项目刚刚启动时利益相关者（stakeholders）的一切需求就被包括在内。因此需求启发的第一步就是鉴别系统的相关利益者。相关利益者不仅包括各种操作系统的直接用户（主要客户），还包括系统生命周期（开

发、制造、调度、后续支持、配置处置、培训和验证等）中所有间接或次要的客户。他们对系统都有各自的需求，并且这些需求常常是有冲突的。

第二步是识别相关利益者及其有关人员，并收集具体的需求信息。在这点上，最大的挑战是将不同语言背景利益相关者的有关需求和概念模型翻译过来，并进行统一的描述，这需要系统工程师对利益相关者的世界观有非常敏感和准确的认识。典型的启发方法包括：

- 访谈利益相关者；
- 观察利益相关者；
- 测试与评价系统原型的适用性（usability）；
- 测试现有系统。

6.3.2 需求分析

需求启发过程是收集各种各样的原始想法、愿望和需求，需求分析的结果应该是列出该系统应该能运行的功能清单，包括系统应如何良好地运行这些功能，还需解决下列顾虑：

- 可能的冲突；
- 环境界面；
- 完整性；
- 歧义。

在对需求进行初次分类时，通常是根据利益相关者的类别，分为功能型需求和非功能型需求。功能型需求是从使用者（主要客户）的角度，来描述未来系统的功能。而非功能型需求不直接支持与客户有关的功能，但系统必须满足这些需求。表 6-1 列出了对敞篷车车顶系统电子控制单元（ECU）的需求样单。

表 6-1 敞篷车车顶系统的需求实例（来源：宝马）

需　求	类　型
通过车内开关，可实现顶篷启闭	功能
雨中停车，顶篷能够自动关闭	功能
当车速超过 30km/h 时，顶篷不可进行启闭操作	非功能
车顶系统控制器的闪烁频率，不得超过 5min	非功能

作为未来汽车电子系统设计的一个坚实基础，系统需求必须满足确切的质量标准。从系统工程的角度来看，它们必须满足：

- 可实现性；
- 可验证性；
- 明确性；
- 完整性；
- 表达需求，而非解决方案；
- 与其他需求相一致；
- 与系统的层次结构相适应。

6.3.3 需求表达

最后，必须制定正式文本来阐述、评估和批复相关需求，作为后续系统设计的约束基

础。典型的文本格式有制定流程规范，或通过案例说明系统如何响应外部特定需求。那些支持需求管理的 IT 工具（如 Telelogic/IBM 的 DOORS 等）常常使用数据库系统，不但让文档组织得有条理，并且连接需求属性，同时为一般办公应用提供接口。

6.4　汽车 E-E 系统构架

汽车电子系统的设计开始于建立一个由特定要求自上而下产生的系统构架，从整车需求（规格参数）为起点，自上而下创建系统构架（system architecture）。整车需求（规格参数）阐明了汽车电子系统的功能，而系统构架从逻辑、功能和技术层面描述了系统实现这些功能的途径。系统构架定义了整车和来自供应商的部件之间的接口参数（连接关系），因此涉及这些汽车供应商的开发与制造过程。因此，系统构架的创建能力是整车制造商的核心竞争力，需要一个高度专业化的合作开发伙伴。

6.4.1　逻辑系统构架

整车层面的系统需求可分解成许多子功能，这些子功能通过其内部和外部接口共同组成了逻辑系统构架。内部接口定义了不同子系统间所需的通信线路，而外部接口描述了以系统环境为对象（尤其与驾驶人和乘客相关）的输入与输出。逻辑架构系统可以用一个框图来表示，其中每一个框代表一项子功能。图 6-4 展示了宝马夜视系统的逻辑架构系统框图。

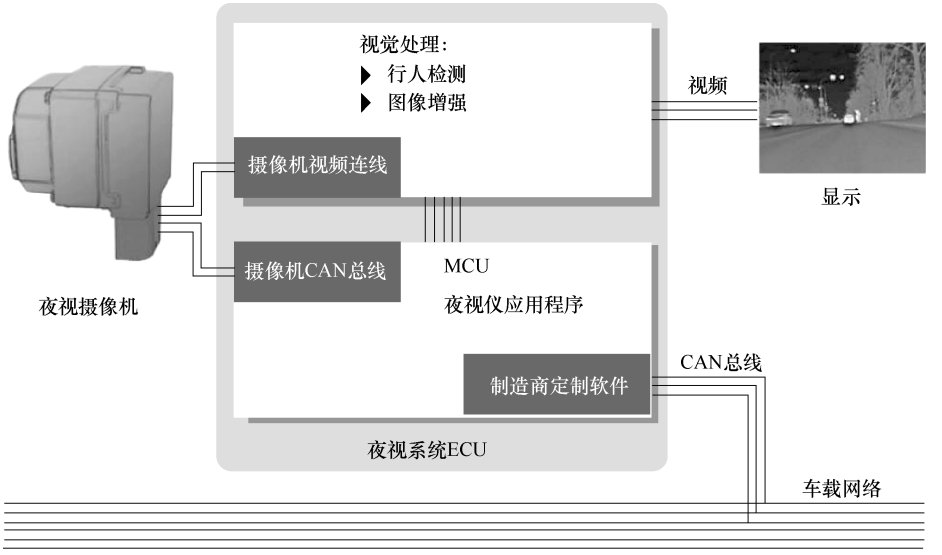


图 6-4　夜视子系统框图

6.4.2　技术系统构架

1. 分区部署（partitioning）

在接下来的分区部署过程中，逻辑系统架构的功能被映射到技术系统架构的可实现要素中（图 6-5）：各种电控单元（ECU）、传感器、执行机构、总线系统（硬件架构）和应用程

序（软件架构）。将软件部分（应用程序）映射到各种电控单元硬件（ECU）的过程称为部署（deployment）。

移动网络通信性能的日益强大，使得越来越多的汽车特定功能被分配到车外计算机上，也就是所谓的后端服务器。这时，汽车实际上是在运行来自互联网的应用程序（例如，基于路径规划算法的导航系统互联网），而不是车载软件。

为了能在早期开发阶段就优化系统，开发人员创建了多种分区部署方法，并根据以下标准来评价优劣：

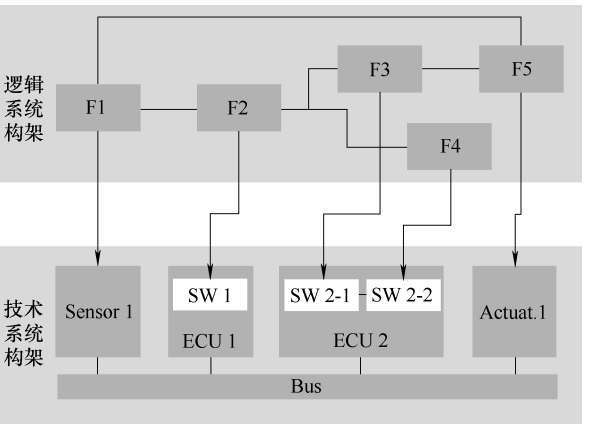


图 6-5　分区部署

- 需求实现程度；
- 技术风险；
- 开发风险；
- 开发流程；
- 系统性能；
- 组织结构；
- 兼容性；
- 耐久性。

最后，开发人员选择各项评价指标总体最优的划分方法来进行后续开发。

2. 总线系统

创建技术系统构架时，除了要向特定的硬件和软件分派功能，还包括定义用于电控单元（ECU）之间通信的外部总线系统。一个总线系统的技术特征包括总线协议、载体的技术特性（如电缆），以及各个电控单元（ECU）相互连接的拓扑结构。如何选用最合适的总线系统取决于结构域中的主要需求参数，如数据传输的速度、容量和数据传输的可靠性。

- 信息娱乐系统：多媒体功能需要极高的传输频率（如视频流），而对可靠性方面的要求相对比较低。其典型的总线协议是面向媒体的系统传输总线（Media Oriented System Transport，MOST）或以太网（Ethernet）。

- 车身电子系统：其可靠性要求特别高（如汽车准入系统、刮水器等），而数据的传输速率较低，其典型的总线协议是低速 CAN 总线。

- 底盘和驾驶辅助系统：这些功能需要可靠的实时响应，典型的总线协议是高速 CAN 总线。

- 动力传动系统：其数据传输要求与底盘和辅助驾驶系统相似，所以典型的总线协议也是高速 CAN 总线。

- 车身被动安全系统：需要最高的可靠性和实时响应性能。典型的总线协议是 TTCAN、Byteflight 或 FlexRay 总线。

表 6-2 以新款宝马 7 系为例比较了汽车采用不同结构域的总线系统类型及规格参数。

表 6-2　豪华型轿车电子结构域的技术参数

	信息娱乐系统	车身电子系统	底盘和驾驶辅助系统	动力传动系统	车身被动安全系统
程序大小	100 MB	2.5 MB	4.5 MB	2 MB	1.5 MB
ECU 数量（标准）	4	5	6	3	11
ECU 数量（可选）	12	30	10	6	12
总线类型	MOST	K-CAN	F-CAN/PT-CAN	LoCAN/PT-CAN	SI-BUS
带宽	22 Mbit/s	100 kbit/s	500 kbit/s	500 kbit/s	10 Mbit/s
程序代码数	660	300	180	36	20
周期	20 ms ~ 5 s	50 ms ~ 2 s	10 ms ~ 1 s	10 ms ~ 10 s	50 ms
可靠性要求	低	高/低	高	高	非常高
传输介质	光纤	铜线	铜线	铜线	光纤
总线拓扑结构	环形	树形	树形	树形	星形

图 6-6 为一个完整的车辆技术体系构架。连接不同技术域的汽车总成部件的总线通过中央网关模块相互连接，它也用于连接非车载计算机与无线通信的数据存储。

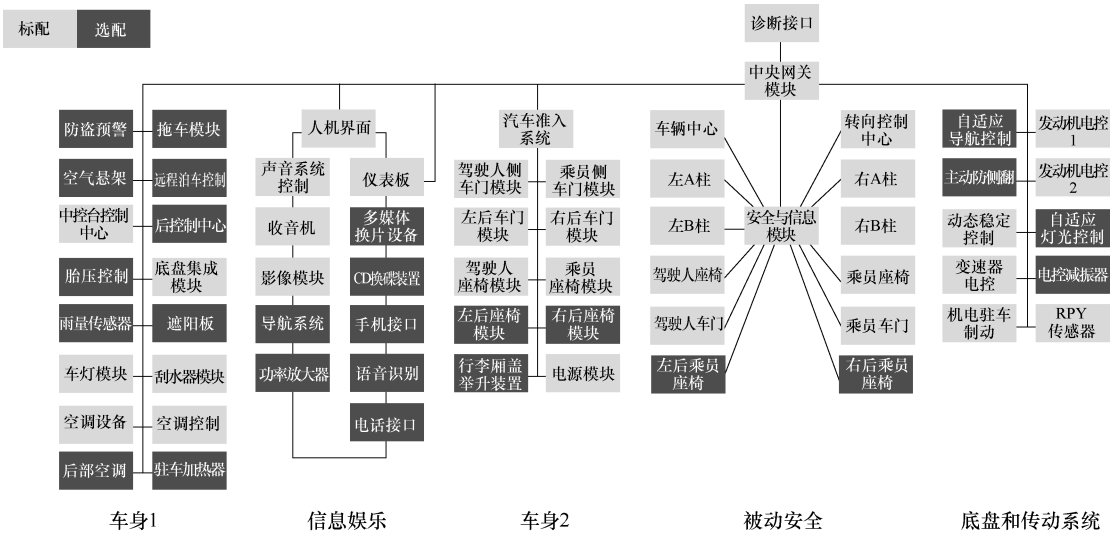


图 6-6　豪华汽车技术体系构架

技术系统架构不但要管理一个汽车电子系统的运作，还必须集成到整车开发流程中，如概念设计阶段（3.2 节）、整车几何集成（5.2 节）、生产集成和服务集成。

汽车电子系统构架过程的每个步骤都需要各种设计方法和 IT 工具的支持。作为逻辑系统架构的典型代表，功能网（Function Nets）是通过实时统一建模语言（UML-RT）来建模的，该语言已成为利用各种 IT 工具的准标准建模技术，如 IBM 公司的 UML 可视化建模工具（Rational Rose）。

6.5 汽车 E-E 系统设计与开发

6.5.1 软硬件组成

在汽车电子系统开发的过程中，系统开发是指设计各种电子控制单元（ECU）与元件（传感器、执行器等）以及对已完成设计的单元子系统的验证。电子控制单元的相关元器件包括：

- 微型控制器：一个植入芯片的功能计算机，包括中央处理器（CPU）、随机存取存储器（RAM）、可编程只读存储器（EEPROM）、输入/输出端口等。
- 基础软件：包括操作系统、内部与外部数据通信软件、网络管理等，如根据 OSEK/ISO 17356 标准编写的各种软件。
- 应用软件：用于控制和执行所需功能的程序。
- 中端软件：它允许应用程序共用一个独立于数据总线系统和操作系统的应用编程接口（API）。
- 机械元件：印制电路板（PCB）、外壳、屏蔽层和终端接口等。

中间件（Middleware）是一种独立的系统软件或服务程序，分布式应用软件借助这种软件在不同的技术之间共享资源。它是软件和硬件在车型系列、OEM 厂商和（或）供应商之间的可互换性的重要先决条件。在众多中端软件中，汽车开放系统架构（AUTomotive Open System Architecture，AUTOSAR）的运行环境已成为一项汽车行业标准。通过指定的接口及其通信机制，应用程序从底层硬件和基础软件中分离，使标准库功能的实现成为可能。图 6-7 展示

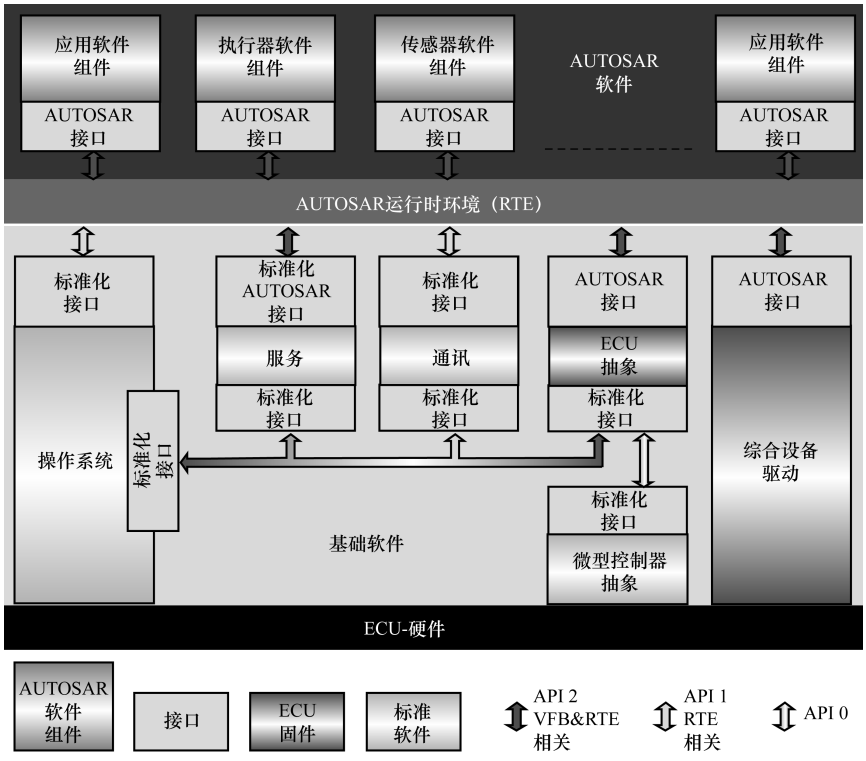


图 6-7 AUTOSAR 标准 ECU 软件架构（来源：AUTOSAR）

了 AUTOSAR 标准的 ECU 软件架构。

电控单元（ECU）的硬件设计包括电子元器件的尺寸标注和选用，如电路设计、印制电路板（PCB）布局、定义和布置所需接口的规格以及设计合适的部件外壳［图 6-8 所示的发动机控制器（前）和电子气门控制器（后）］等。其相应的力学性能测试将在 15.3 节中讨论。

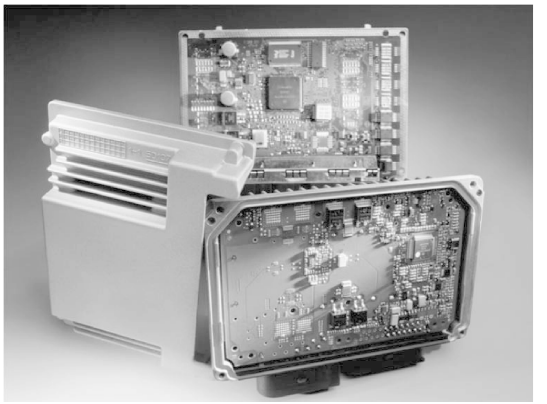


图 6-8　EUC 硬件（来源：宝马）

6.5.2　应用软件开发

应用软件开发是零部件设计的核心过程，因为它定义了零部件功能与行为方式。第一步，开发人员创建一个描述所需数学函数、算法和部件接口（输入和输出接口）的函数模型。IT 工具包（例如，Math Works 公司的 Matlab 或 ETAS 公司的 ASCET）为功能建模、MIL（闭环模型）和 SIL（闭环软件）的仿真（包括完整的硬件环境模拟）以及对应用软件 C 代码（遵循汇编代码编写）的生成过程的故障分析提供综合支持。

第二步，在应用过程中设置软件参数，例如，将发动机和变速器类型作为发动机控制软件的参数。这些应用程序数据、汇编程序和所需的附加数据（例如，用于诊断的程序）随后被链接到一个二进制程序文件，然后烧录（“嵌入”）到控制器的 EEPROM 中。

6.5.3　系统模块测试

汽车电子系统设计的下一步骤是测试已经嵌入应用软件的电控单元（ECU）。为了能同步开发电控单元（ECU）及其外围部件，这些测试在可以电子模拟电控单元（ECU）接口（传感器和执行器）的 HIL（硬件回路）试验台上进行。例如，某款仪表板的 HIL 仿真平台（图 6-9）可以模拟所有用于传递信息显示的数据（显示所需数据）（如发动机转速、车速、燃油量）的传感器。

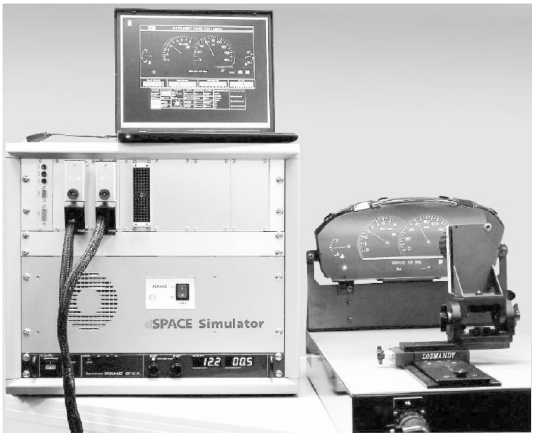


图 6-9　仪表板硬件回路试验台（来源：dSPACE）

6.6 汽车 E-E 系统集成和验证

系统集成是指各自（内部或外部）研发中心（CoCs）所开发的汽车零部件，在物理和功能上集成到一个整车系统中，并确保实现系统所需功能的过程。在整个产品开发流程（PEP）中，一个正式的系统集成流程（图 6-10）贯穿于每个创建阶段（第一组原型车制作，第二组原型车制作，预量产车生产等，对照 3.3 节），以确保车辆各自的功能性。

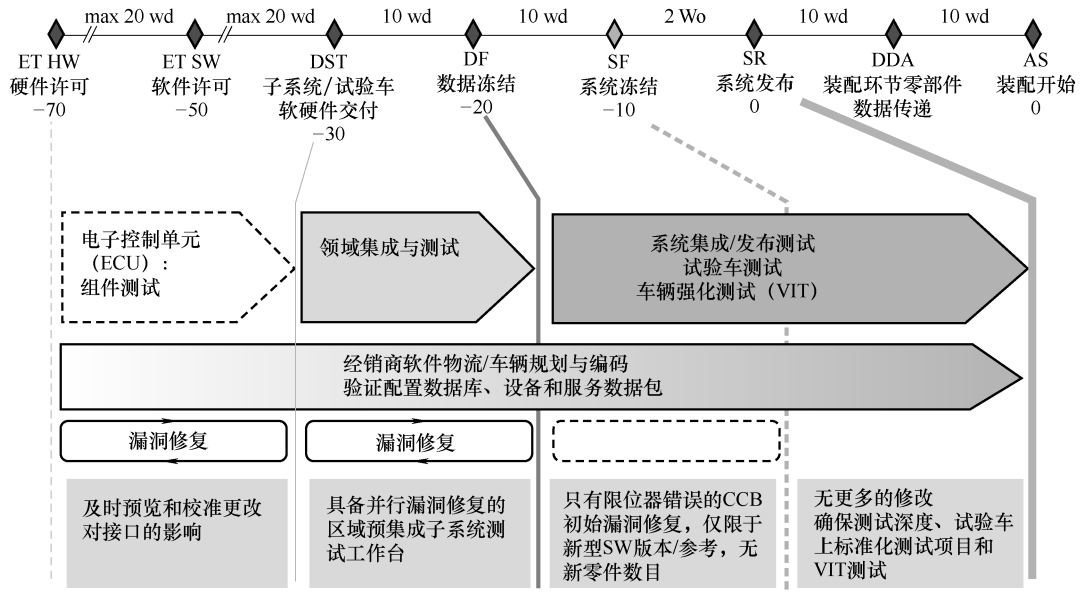


图 6-10 电子电器系统集成流程（来源：宝马）

在这个过程的开始阶段，为了进行系统集成，需要对研发中心（CoCs）的每个单元器件进行注册，这些单元器件将作为汽车电子（E-E）系统的一部分。经过研发中心的资格预审并移交给系统集成部门，所有元器件将受到系统集成流程的严格变更控制，并将作为一个子系统或整车系统的一部分进行验证。

6.6.1 汽车 E-E 子系统集成

在子系统试验台上，完成某一特定功能的汽车零部件被连接到适当的总线系统中。为了创造测试环境下子系统的真实行为（显示子系统在测试环境下的真实表现），也对不属于子系统部分的部件进行了模拟。子系统级的测试项目包括客户功能和系统功能，如机械、化学或气压、静态电流、电磁兼容性等。图 6-11 显示了一辆汽车车灯子系统试验台。

图 6-11 汽车车灯子系统试验台（来源：宝马）

在子系统运行的测试内容包括：

- 编码（Coding）；
- 烧录（Flashing）；
- 诊断工作；
- 总线诊断（CAN DTCs）；
- 睡眠和唤醒测试；
- 用户选择/客户功能。

在子系统测试中发现的问题被反馈到研发中心，随后由研发中心处理，直到子系统在测试中通过验证。

6.6.2　整车 E-E 系统集成

在子系统分别构建、测试和验证之后，为了建立起整个汽车电子系统，需将它们进行连续的集成。对不同的子系统进行物理和功能上的联结，然后测试它们之间的交互作用并实现整个系统功能。第一步，所有的汽车电子系统都被相互连接起来，并固定在测试骡车（Mule Car）上（图 6-12），对系统功能和非驾驶客户功能进行评估。

图 6-12　汽车电子系统测试骡车（来源：宝马）

在固定式测试骡车上进行的测试内容包括：

- 定位/配线
- 电压测试
- 全天候测试
- 网关测试
- 诊断工作
- 总线物理状态
- 选择用户/客户功能
- 总线负荷
- 编码
- 上电/掉电
- 休眠电流
- 误用测试
- 烧录

一辆固定式测试骡车上可测试约 80% 的整车电子系统功能。为了评估整个系统内部和外部的客户意见，必须研究不同时期的原型车。这些所谓的动态试验车都配有综合的检测设备（图 6-13），其文档记录所有总线数据流量，从而可以跟踪电子故障和验证动态的电子系统功能（如发动机控制、变速器控制、底盘控制系统）。此外，检测到的问题由研发中心来解决。

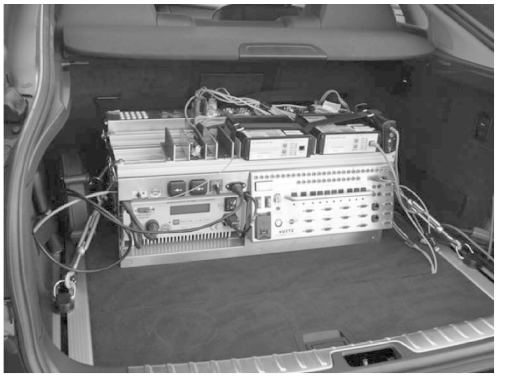


图 6-13　动态试验车上的检测设备（来源：宝马）

在系统工程的结束阶段，系统集成发布一套确定的并已被验证的整车电子系统配置，称作“集成程度水平”。

6.7　系统配套管理

已经讨论过的技术开发流程，管理流程支撑着整个汽车电子系统的成功实现。除了通常

的项目管理，两大主要配套管理流程是配置管理和风险管理。

6.7.1 配置管理

正如几何集成（见5.2节）那样，在创建原型样车（见3.3.3节）前要确保整车设计的几何一致性，通过系统集成使得E-E系统配置有效（所有车辆的硬件和软件的功能是一致的）。因此，在每一个新车型开发项目的硬件配置阶段（图6-14），均会反复引用图6-3所示的系统管理V模型。

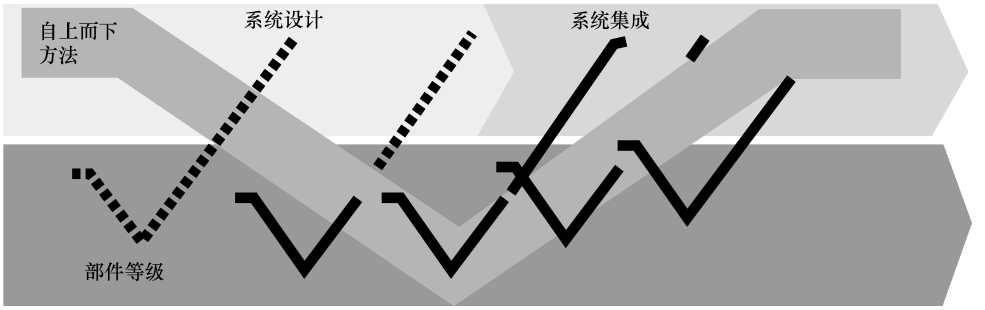


图6-14 产品开发流程的集成与验证循环（来源：宝马）

这里，配置管理的任务是构造、标注、记录和控制软硬件组件的所有版本、变型车及由它们组成的所有有效的系统配置。

软件或硬件构件不允许临时变化，而是由一个可变换控制板（Change Control Board，CCB）来控制，该控制台可以评估变更请求和分析整个系统的潜在效益及潜在风险。

为了实现车辆硬件所需的电子/电器功能，配置管理也需要对变型车型分别规划有效的系统配置（如发动机选配项、特定的国家版本、可选配置等），并确保汽车已验证配置的最新性。

图6-15显示了一个汽车项目的配置规划。第一个原型创建团队创建的车辆系统配置表示集成水平I200，随后升级为I210、I220等。类似地，第二个原型创建团队创建的车辆集成水平被称为I3xx，预量产系列车为I4xx，销售给客户的系列车辆的集成水平为I5xx。

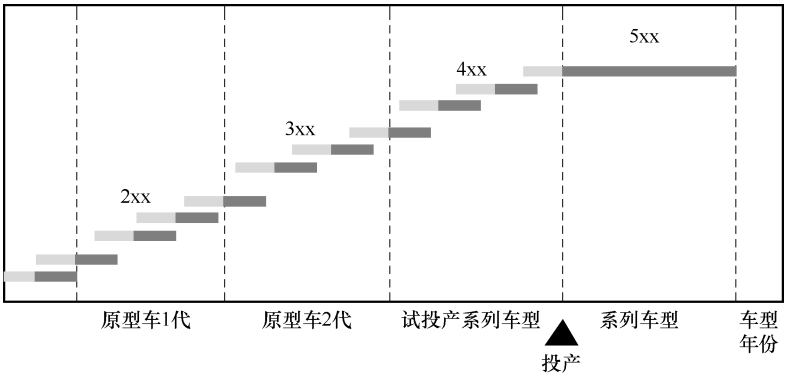


图6-15 系统配置规划（来源：宝马）

6.7.2 风险管理

在每一个汽车项目中，汽车电子系统的研发过程存在大量的风险，这会对实现规划的系

统目标和质量、进度、成本方面的表现产生负面影响。工程师和管理人员是否了解、探知这些风险的存在？并做出解决相关问题的预案？那么，了解这些存在的风险，是一个可以避免产生突发问题的机会。

风险的前提条件是一个对未来因素关系的推测，即如果消除或纠正该因素，则可以预防发生潜在的不良后果。因此，风险所指的两个参数是：

- 未来发生风险根源的概率；
- 风险根源产生的后果。

风险管理作为系统工程的一项基本支撑，包括四个主要元素：

- 目标的规划、活动的规划、资源获取的规划、通信的规划等。
- 风险识别和定量评价。风险与 E-E 系统有关，其本身包括上游的外部系统、对系统开发流程及其外部的影响。
- 实施风险的缓解或消除措施。这包括风险规避（例如，通过牺牲系统性能来降低风险），通过系统的设计措施将风险降至可接受的水平，接受风险或进行系统间（从一个系统区域到另一个系统区域）的风险转移（如从软件到硬件）。
- 监测、记录和报告所采取的措施，从而确保风险的缓解，并对风险状况和沟通管理情况进行重新评估。

图 6-16 说明了风险管理中的四个关键要素。

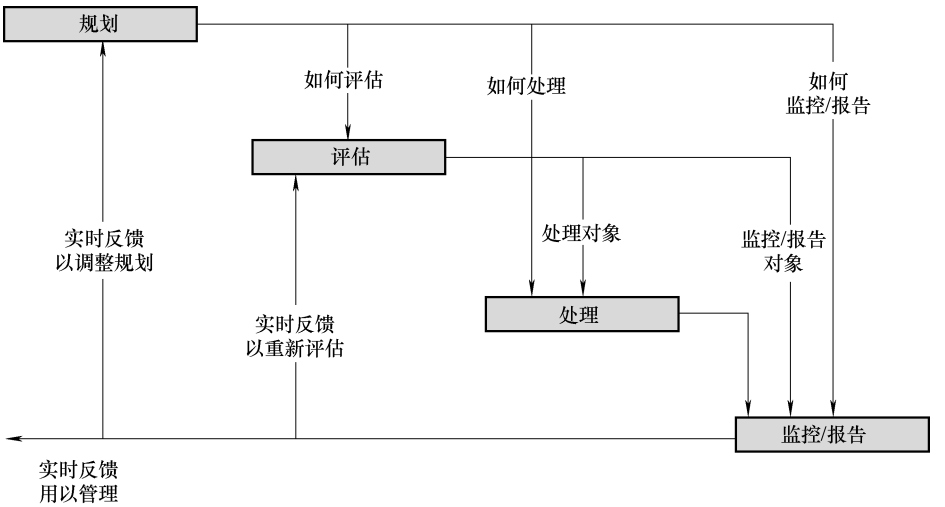


图 6-16　风险管理控制与反馈

6.8　能力成熟度模型集成

作为产品开发过程的一部分，在规划的时间与预算内完成对车辆电子电器系统的开发，主要依靠已有系统开发过程的完善程度。能力成熟度模型集成（CMMI）是一组由美国卡内基梅隆大学软件工程研究所（SEI）开发的过程模型，对软件或系统工程流程的有效组织提供目标（目前已被证实的最佳执行方法）。这些目标是由 23 个过程域（表 6-3）所指定的，相关执行方法集群共同实施后，满足一个重要的目标，以改善该区域的目标设定。这些过程

域可以分为四大类。

在工艺的评估和改进方面，CMMI 方法提供了两种不同的途径：一种是对组织成熟度分阶段式表述，另一种是关于在不同的过程域组织能力的连续式表述。

表 6-3 能力成熟度模型集成（CMMI）过程域（来源：卡内基梅隆大学）

类 别	流 程 领 域
项目管理	项目规划 项目监督与控制 供应商合同管理 集成化项目管理 集成化供应商管理 集成化团队管理 风险管理、定量项目管理
支持管理	配置管理 过程和产品质量保证 度量和分析 因果分析和解决方案 决策分析和解决方案
工程管理	需求管理 需求开发 技术解决方案 产品集成 验证 确认
过程管理	组织过程焦点 组织过程定义 组织培训 组织过程性能 组织创新与部署

6.8.1 组织成熟度等级

以软件开发而非系统开发为主题，以最佳的实践过程为基础，将 23 个过程域分为五个阶段，分别代表所提高的成熟度等级。通过一个成熟度等级来表示 23 个过程域（表 6-4）一个组织在成熟度达到 5 级时就表示已经完成 23 个过程域的所有目标。

表 6-4 组织成熟度等级（来源：卡内基梅隆大学）

等 级	焦 点	关键过程域
等级 1 初级	非正式与临时过程	
等级 2 定性管理级	基础项目管理	需求管理 项目规划 项目监督与控制 供应商合同管理 度量和分析 过程和产品质量保证 配置管理

（续）

等　　级	焦　　点	关键过程域
等级 3 详细设计级	过程标准化	需求开发 技术解决方案 产品集成 验证 确认 组织过程焦点 组织过程定义 组织培训 集成化项目管理 风险管理 决策分析和解决方案 集成化团队管理 集成化组织环境 集成化供应商管理
等级 4 定量管理级	量化管理	组织过程性能 量化项目管理
等级 5 最优级	连续过程改进	组织创新与部署 因果分析和解决方案

6.8.2　过程能力等级

当成熟度等级处于一个如同整体研发组织的逐步改进阶段的时候，CMMI 能力等级应用于一个组织的递增过程以改进个别过程域。表 6-5 列出了六个能力递增等级，编号从 0 到 5。

表 6-5　过程能力等级（来源：卡内基梅隆大学）

能 力 等 级	过 程 特 征
等级 0 不完整级	过程不被执行或只是部分执行。指定的过程域中，至少有一个目标未达到要求
等级 1 执行级	满足要求的过程目标。过程中支持并实现所需的工作以产生所要求的结果。随着时间的推移，如果不通过通用的做法将其制度化，能力可能会丢失
等级 2 定性管理级	除了符合等级 1 的要求，过程还需一个基础设施支持，规划和执行与政策保持一致，雇用有能力胜任的熟练员工，并且监测、控制和评估利益相关者，并评价其实际工作能力。等级 2 的功能是，即使在适当的压力下也能够保证现行工作
等级 3 详细设计级	除了满足等级 2 的要求，这个过程根据组织指导方针量身定做，并有助于产品生产、测量以及通过其他过程改进信息来组织过程资产。相比等级 2，等级 3 更严格地规定了陈述目的、投入、准入条件、活动、任务、措施、验证步骤、输出和退出条件
等级 4 定量管理级	除了满足等级 3 的要求，在统计上控制过程，并用定量的质量和性能目标管理过程
等级 5 最优级	除了满足等级 4 的要求，作为过程性能持续改善的基础，应当充分理解过程变异的原因

第7章

整车开发流程管理

为了很好地控制一个车辆开发项目的进度，并最佳地利用新产品开发流程中所涉及的资源，整车开发项目管理采用了多种不同的方法和流程。如“目标管理”，即包括制定、协调和更新车辆技术参数；“问题管理”，即对整车集成过程中的设计问题进行登记和管控；“车型发布和变更管理”，即负责对汽车零部件的发布及设计变更评估进行清晰标识；“质量管理”，即为整个新车型开发及生产活动提供保证，确保新产品（车型）能够达到预定的性能目标。

7.1 可注册性

显然，使自己辛苦开发的新车型能获得注册许可（形式核准），是所有开发人员、整车制造商与配套零部件商的共同希望与要求，也是潜在客户的心愿。尤其对于整车制造商，没有注册许可，就无法销售，就无法获得投资回报与收益。此外，在新车型开发立项之初，就要符合车辆性能工作状态与现有有关规章的要求，并且还要保证在未来新车型投产、服役直至报废的整个产品生命周期中与可能出现的新法律规章保持一致，这也作为其可靠性的一部分（区别于16.1节）。

7.1.1 全球机动车法律法规的历史变迁

国际上，最早涉及的车辆道路法规源于20世纪初。在1909年，德国的《道路交通法》开始实施，该法规给出了关于零部件实用性和特性，如制动、转向、车灯、转向齿轮、喇叭和防盗装置的详细技术要求，并于1937年被纳入德国《车辆登记技术要求条例》，在1995年前一直是德国注册审批新车型的依据。

早期不同国家与地区的道路车辆注册法规是独立制定的，尤其是当时在欧洲和北美这两个最大的汽车市场。除了极少数情况，这两个市场上都销售本土产品，因此也就没必要相互统一法规。但后来，不同的车辆注册法规不仅在如何实现安全或者经济友好方面产生分歧，而且逐渐成为各国一种控制进口的手段。

1956年，联合国欧洲经济委员会（UNECE）的内陆运输委员会（ITC）下的附属机构全球车辆法规协调论坛［The UNECE World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations (WP.29)］将《罗马协定》作为处理道路交通安全事宜和协调不同国家间贸易壁垒的第一个法规。

该文件的正式头衔是：关于采用统一技术条件批准机动车辆装备和部件并相互承认此批准的协议书。

该法规促成了《联合国欧洲经济委员会协定（1958）》或《日内瓦协定》的制定，旨在

消除国家间汽车工业贸易壁垒，获得了 33 个联合国欧洲经济委员会成员国，以及日本、澳大利亚、南非、新西兰等国的认可。它包含 114 项有关汽车系统、部件和装备，非整车的共同技术性联合国欧洲经济委员会法规，一项共同的车型认证流程，并在缔约成员国之间达成共识。

在美国，国家公路交通安全管理局（NHTSA）拥有立法权，可以发布安全标准和法规，其制定的《联邦机动车安全标准》（FMVSS）是机动车和相关设备制造商必须遵守、服从的。该法规旨在降低事故的发生率和事故中的伤亡率。1967 年 3 月 1 日，“FMVSS 209 安全带技术要求”成为第一条 NHTSA 宣布生效的标准。此后，NHTSA 还陆续在碰撞规避、耐撞性、碰撞后（事故）处理等方面制定了 85 条标准，及其他一些标准。

《机动车空气污染控制法案》颁布于 1965 年，它是 1963 年《空气清洁法案》的一个修正案。该法案重新对 1968 个车型设定了排放指标，相对于 1963 年的标准，要求碳氢化合物排放量、一氧化碳排放量分别减少 72% 和 56%，而曲轴箱碳氢化合物排放量为原来的 1/2。在没有签署 1958 年《日内瓦协定》的国家中，有两个非常引人关注：美国和加拿大。两国各自遵循的是 FMVSS 和与前者高度类似的北美机动车安全标准（CMVSS）。至今，美国和加拿大两国都不认可 UNECE 准则，反之亦然。这意味着，要是没有适当的技术修改，车辆将不能在北美和其他国家间相互进出口。

对前照灯的不同要求就是一个典型的例子。在美国，FMVSS 108 是被强制执行的，但实际上，世界上其他地区要求车辆前照灯参照的均是 UNECE 37 给出的标准。两标准的主要区别在于，通过跳闪近光灯向其他驾驶人示意的允许次数、用于照亮道路前方所需的最小光照强度，及在指定的最小、最大光照强度下光束的具体位置。由于每个体系的拥护者都认为其他标准是不安全的，想要将自己在北美的汽车运至欧洲（或者从欧洲运至北美）的车主，不得不更换前照灯装置，以便让车辆获得注册许可。如果前照灯无法符合相关规范，车辆就无法完成注册。

为了改善这一状况，在全球车辆法规协调论坛（WP. 29）牵头下，欧盟、日本、美国等进行了数轮谈判，并最终对《欧洲联合经济委员会全球协定（1998）》达成一致意见。虽然协定并没有要求各国对许可达成一致意见，但它建立了一个重要的流程，在这一流程中，协定参与国能够共同制定有关车辆安全、环保（空气和噪声污染）、能源和防盗等方面的要求，以及排气系统、轮胎、发动机、隔音材料、防盗报警、警告装置、儿童约束系统等全球性技术规范（GTR）。在 2000 年 3 月，车辆结构工作小组（WP. 29）更名为“世界车辆法规协调会”。而在努力协调各国之间汽车法律法规的同时，全球范围内的机动车法规总量也有了极大增长。图 7-1 显示了不同国家历年的法规总量和未来预期。

7. 1. 2　新车型认证技术规范

在大多数国家，为了达到认证许可的规格要求，车辆的技术规格通常需要满足如下几方面要求：

- 车牌、制造商铭牌、车辆识别码（VIN）等的位置；
- 发动机功率；
- 车重及尺寸；
- 主动安全性（事故保护）；

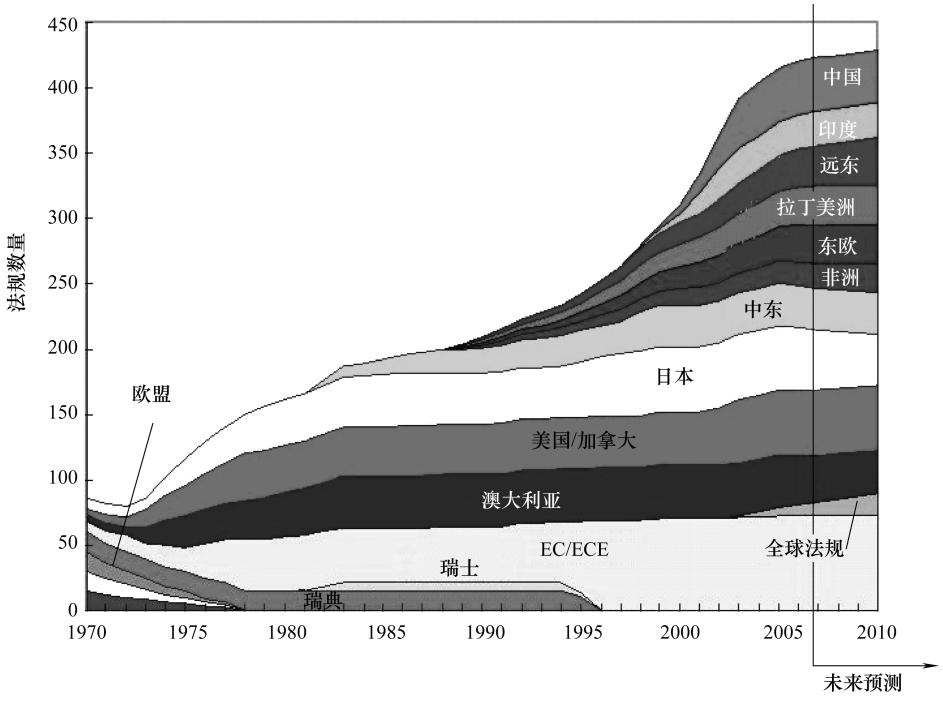


图 7-1　全球机动车法律法规增长图

  - 制动系统；
  - 驾驶人视野；
  - 轮胎；
  - 车灯；
  - 抗电磁干扰。
- 被动安全性（减轻伤害）；
- 排放：
  - 废气；
  - 噪声；
  - 蒸气；
  - 电磁波。
- 防盗性。

法规的要求涉及客户范畴（如被动安全性）、功能范畴（如排放）和物理范畴（如车辆尺寸），参照图 7-1。

只有满足法规的要求，开发出来的新车型才允许上路行驶。对于整车制造商和供应商而言，认证过程的复杂性是如下三个原因导致的：

- 在不同的市场，法规要求和相应审批流程各不相同；
- 法规要求是一个贯穿了如重量、尺寸、排放、被动安全、隔音等车辆特性的交叉体；
- 相关法律法规要求更新迅速。

因此，从某款车投产开始，开发部门就要了解并遵守所有目标市场中的所有车辆法规，同时紧密贴合这些法规未来的发展趋势，以确保考虑中的车辆在整个使用周期中都能获得注册认可。否则，汽车制造商就会使他们的客户面临一些风险：增加额外购置成本（例如，因为无法满足更为严格的排放限制，需要支出额外的费用和附加税）；大幅损害使用价值（例如，因最新法规对行驶在市中心的车辆尺寸进行了限制，导致其无法进入）；大幅降低车辆价格或以以旧换新的价格再销售，最糟糕的甚至使其没有上路行驶的资格（例如，无法满足提高的安全标准）。

一些法规（尤其是关于车辆排放方面的）由于很大程度上取决于国家当前政策，相对不稳定。如德国汽车制造商协会（VDA）、美国汽车制造商协会（AAMA）、日本汽车制造商协会（JAMA）等主要汽车工业国家级代表，与如欧洲汽车制造商协会（ACEA）、国际汽车制造商组织（OICA）这样的全球代表，会向各自的政府施加政治影响，以共同创建一个负责、真实、合理的法规环境。

7.1.3　各国新车注册认证相关法律法规

整车注册认证是一项政府手段，以确保机动车的道路行驶安全，使车辆符合环保标准，而不用对每辆车都进行检测。就如技术要求一样，在欧洲和北美，机动车规范认证的流程通常是有差别的。

1. 美国—自我认证—强制召回

1953 年，美国在全球首先颁发《联邦车辆法》，政府由此开始对车辆进行有法可依的管理。与美国的政体一样，美国汽车法规有联邦法规，也有州法规。按照美国汽车联邦统一的汽车认证，主要分为两个部分：安全认证和环境保护认证。

在美国和加拿大，验证车辆是否完全满足 FMVSS 或 CMVSS 相关标准的工作全交由制造商单独完成。与欧洲的规范认证相反，这属于一个自我认证的过程。为了能提供证明，制造商必须采取所有可行的方案，如与 FMVSS 或 CMVSS 标准相一致的实验室测试，或进行其他的研究与分析，以确保车辆能完全遵守法规。国家公路交通安全管理局（NHTSA）或加拿大交通部单独复审一部分车辆和零部件的认证。

美国汽车业实行的是“自我认证”，即汽车制造商按照联邦汽车法规的要求自己进行检查和验证。如果企业认为产品符合法规要求，即可投入生产和销售。因此，“自我认证”体现了美国式的自由，即汽车企业对自己的产品具有直接发言权。

那么，政府的作用如何发挥呢？美国政府主管部门的任务就是对产品进行抽查，以保证车辆的性能符合法规要求。在美国，汽车安全的最高主管机关是隶属于运输部的国家公路交通安全署（NHTSA）。为确保车辆符合联邦机动车安全法规的要求，NHTSA 可随时在制造商不知情的情况下对市场中销售的车辆进行抽查，也有权调验厂家的鉴定实验室数据和其他证据资料。

如果抽查发现车辆不符合安全法规要求，主管机关将向制造商通报，责令其在限期内修正，并要求制造商召回故障车辆，这就是所谓的强制召回。同时，如果不符合法规的车辆造成了交通事故，厂家将面临高额惩罚性罚款。在这种严厉的处罚背景下，汽车企业对产品设计和生产过程中的质量控制不敢有丝毫懈怠，而且对召回非常“热心”，一旦发现车辆质量瑕疵，就主动召回，否则，被公路交通安全署查出，后果不堪设想。因此美国的自我认证方

式，尽管表面看来较宽松，实际上，汽车企业要真正对自己的产品负责，所以制造商并不敢弄虚作假。

每年，制造商必须对每辆车都进行一个明确限定的可控的排放规范认证。零部件的耐久性也必须认证。这一程序大约需要 18 个月。由排放许可确定的燃油消耗量会受到规章机构的复查。

美国的自我认证制度相比于形式认证制度而言有两个特点：在产品销售前产品是否符合法规，企业有自主处置权，政府不予以干预，但是企业要承担产品不符合技术法规的风险。政府部门只进行事后的监督。为保证公正性，监督费用全部由政府部门自己支付。为保证科学性，政府监督有一整套严格的程序，并给予企业对政府监督以上诉法院的权利。从这两个特点可以看出，自我认证制度对企业和政府的权利和责任都十分清晰。企业不用履行烦琐的申请、检测、批准等程序，但一旦召回，企业的损失也是巨大的。政府在企业销售产品前也不需要对企业和产品进行管理，但事后监督的工作量很大，政府承担的监督费用也很高。

2. 欧洲—形式认证—自愿召回

欧洲各国实行的虽然也是认证制度，但与美国有较大的区别：美国是由企业自己进行认证的，欧洲则是由独立的第三方认证机构进行认证。而且欧洲对流通过程中车辆质量的管理没有美国那样严格，是通过检查企业的生产一致性来确保产品质量的。因此，美国对汽车的管理是推动式的，政府推着企业走；而欧洲则是拉动式的，政府拉着企业走。

欧洲各国的汽车认证都是由本国的独立认证机构进行的，但标准则是全欧洲统一的，依据的是 ECE 法规、EC 指令，主要有 E 标志认证和 e 标志认证两类。

在欧洲，两个平行的规范认证方案已经共存了二十多年：

- 依照《欧共体（EC）整车认证规范》（ECWVTA）的《欧盟（EU）机动车规范认证》，“2007/46/EC”EU 指令是作为整车注册认证“70/156/EEC”框架指令的一部分。
- 依照联合国欧洲经济委员会（UNECE）对车辆系统和单独零部件（不含整车）的规范认证的《联合国欧洲经济委员会（UNECE）注册认证》。

两个方案都要求申请者向审批局提出正式申请。在测试之前，为了详细说明产品的相关特征，申请者需要根据附录一或附录三提交技术文件。这些文件作为产品样品的审核清单，用于测试，而在测试后，又作为自我审批的基础。

为了遵守相应的 EU 指令或 UNECE 法规，一个被认可的技术流程会对原型车进行检测，该流程必须遵循 EN 45001 标准和由国家审批机关的批准。技术流程会根据附录五给出检测报告，而申请者需要将报告提交给审批机关。依照附录十两个方案都要求产品的一致性。审批机关必须核实申请者已经为确保产品合格的一致性做了充分的准备。在向机关提交一份获 ISO 9001，ISO 9002 或权威部门同等标准的证明后，才算完成了。

如果车辆测试和质量管理体系（QMS）评估都获得了通过，审批机关会根据附录六颁发 EC 形式批准文件，根据附录八颁布检测结果单，根据附录九颁布合格证书。

召回，在欧洲也是“家常便饭”。与美国不同的是欧洲实行企业自愿召回，企业发现车辆有问题，就可自行召回，但要向国家主管机关上报备案。但如果企业隐瞒重大质量隐患或藏匿用户投诉，一经核实将面临处罚。

欧洲形式认证制度的特点是政府全过程介入了企业使产品符合技术法规的活动，产品的投产需经过政府的批准。从法律角度来讲，政府在拥有批准企业产品合格权力的同时也将自

己与企业的责任联系到了一起。严格说如果企业生产的产品出现了不符合技术法规的情况，政府应承担责任。

3. 日本—独具特色的形式认证

日本汽车形式认证制度产生于 20 世纪 50 年代。日本的汽车认证制度总体上来讲与欧洲一样，是形式认证制度，但也很有特色。之所以有特色，是因为它的认证体系由《汽车形式指定制度》《新型汽车申报制度》《进口汽车特别管理制度》三个认证制度组成。根据这些制度，汽车制造商在新型车的生产和销售之前要预先向运输省提出申请以接受检查。

《形式指定制度》对具有同一构造装置、性能，并且大量生产的汽车进行检查。《新型汽车申报制度》针对的是形式多样而生产数量不是特别多的车型，如大型货车、公共汽车等。《进口汽车特别管理制度》针对的则是进口车。

《形式指定制度》是日本形式认证制度的特点，该制度审查的项目主要有：

1）汽车是否符合安全基准（车辆的尺寸、重量，车体的强度，各装置的机能，排气量，噪声等）。

2）汽车的均一共同性（生产阶段的质量管理体制）。

3）汽车成车后的检查体制等。以上的检验合格后，制造商才能拿到该车型的出厂检验合格证。但获得形式认证后，还要由运输省进行“初始检查”，目的是保证每一辆在道路上行驶的车都要达标。达标后的车辆依法注册后就可以投入使用了。但如果投放市场的车辆与检验时的配备不同，顾客可以投诉。

日本实行的召回制是由厂家将顾客投诉上报运输省，如果厂家隐瞒真相，将顾客的投诉束之高阁，造成安全问题后，政府主管部门会实行高额惩罚。

尽管美、欧、日三个形式认证各具特色，但随着汽车市场全球化进一步发展，世界汽车认证管理方法已呈现出相融的趋势，我国实行认证制度也应该吸收各家之长。

4. 中国—公告管理为主，其他认证形式并存

从严格意义上说，我国目前不存在汽车产品形式认证制度。我国《公告》管理的前身《目录》管理产生于 1985 年，最初《目录》上的整车企业只有 60 多家。从 2001 年起，《目录》逐渐过渡到了《公告》，这是对《目录》的重大改革。现在《公告》在产品检测、监督等方面，十分接近于形式认证，只是管理的内容还比较少，如节能和防盗几乎没有列进去。

中国目前采用的是与欧洲相同的形式认证制度，在中国称为认证，它是按照《机动车辆类强制性认证实施规则——汽车产品》实施的，实行的是形式试验初始工厂审查获证后监督的认证模式。由于采用的是欧洲的认证制度，中国主要采用欧洲法规作为本国标准制定的蓝本。

目前汽车产品进入国内市场，需进行以下认证即获得销售资格：国家发展和改革委员会《公告》、中国质量认证中心《CCC 认证证书》（中国强制性认证）、国家环境保护部《国家环保目录》、北京环保局《北京环保目录》。而上述政府各部门对汽车行业的管理并不存在多少横向联系，而是根据本部门职能对汽车行业进行纵向垂直管理。如国家发展和改革委员会《公告》目前仍是汽车上牌照的最重要依据；中国质量认证中心受国家认证认可监督管理委员会委托受理汽车产品 CCC 认证，CCC 认证是汽车产品生产、出厂销售、使用的依据；《国家环保目录》是国家环境保护部依据环保法规对汽车排放、噪声等提出的要求；《北京

环保目录》是北京市为防止大气污染对汽车排放提出更高阶段的要求。

为了应对数量众多的法规，确保遵守法规的任务通常由不同职务的专家负责：项目认证领导人负责一个具体汽车项目的认证工作，并从车辆开始开发到投入生产全过程协调项目的注册审批事宜。而认证专家需要对某个具体领域（如排放）的国际法规有非常全面的了解。在这个领域，他们是同行间的主要结合点，需要让同事了解最新的国际法规变化趋势和它们对产品开发的影响。通过协调项目认证领导人和各个国家的专家，进行系统认证。各国专家的专长在于熟知一个或多个国家的法规要求。尤其对于销售子公司和进口商的认证伙伴，他们负责一个国家所有商品的审批工作，需要让他们的同行了解特定国家相关法规的最新趋势。

7.2 目标管理

7.2.1 开发目标

新产品（新车型）开发事项之一是开发的新产品（新车型）应符合设计要求。整车的要求（参照6.3节）主要是由法律要求和顾客要求组成的。法律要求是指在预期市场中，所有的车辆必须进行注册；而顾客要求是指潜在消费者直观感知到的汽车功能和特性。虽然法律要求通常也由政府指令和法规规定（如美国安全标准），但客户的要求是相对主观的。客户追求车辆功能和特性来满足他们的个人需求，当然这必须符合法律规定。

客户所关心的不同功能和特性（如设计形象、动态特性或座舱舒适性）以及相应的法律法规或客户的个人需求，包括如何最终实现这些功能和特性所要的流程与方法，将在第三部分有关章节中详细论述。

新车型开发成功的一个先决条件是必须对客户需求（顾客设想或需要的）和技术功能（意思是顾客根据其需求提出问题，工程师来解决这些问题）有所区分。客户的相关问题明确指出了客户域。例如，对于舒适度而言，驾驶人和乘客只是希望在车辆座舱中有令人愉快的氛围，即：

- 头/身体/脚的感知温度；
- 驾驶室内内饰表面（尤其是座套）的感知温度；
- 感知温度的稳定性；
- 感知的空气流动；
- 窗口除霜所需的时间；
- 温度和空气流量的易调节性；
- 供暖、通风及空调装置（HVAC）所造成的附加燃料消耗。

然而设计师在功能范畴（functional domain）通过功能需求规范这些要求，并进一步地在物理范畴（physical domain）通过发布零部件设计参数使其成为开发目标，两者都是代理商用于吸引客户的手段。例如，在上述的温暖舒适性例子中，设计参数有：

- 测量左/右出风口空气温度；
- 测量通过左/右空气导管流量；
- 供暖、通风及空调装置（HVAC）压缩机功率；

- 座椅加热器功率。

当开发域（domains）的区别不清晰时，可能导致不好的结果。如设计师提供一个功能来调整车辆时钟，而忽略了客户的实际需求，并不是非要调整时钟，而仅仅是能够显示正确的时间。因此，正确的解决方案也许只要设置一个能接收无线电波的时钟，或仅仅是一个用于调整时间的界面，或是选择适当时区和切换夏令时的开关。

在汽车开发流程中，开发域通过整车开发团队或零部件设计中心来实施，设计中心（CoCs）设计并在合适的时机发布（release）零部件，整车开发团队决定整车的需求并确保符合汽车开发流程（参照 1.3.2 节）。表 7-1 所示的内容引用自一个有详细需求的目录，这个目录已应用到特定的开发车型。参考文献为客户要求的分类提供了强有力的技术支持。

表 7-1　摘自整车开发目标手册

宝马集团	整车开发目标目录 用户相关车辆特征核对表		期号：5 第 35 页
2　主动安全性/操控性/动力性 2.4　底盘特性 2.4.2　转向稳定性			
技术要求（应做什么?）	评　　估	标准（如何做?）	
2.4.2.1 自转向特性 – 等半径 • 评估自动转向行为的特征函数 • 最大静态横向加速度 • 驾驶行为的动力学评估： 转向不足、过度转向以及中性转向 （参考条目 3.1.3.3）	SZ	EHB（电液制动装置）EG-4　No. 43，56 EHB EF 第 3.4.1 章 稳定转向 ISO 4138，或 伪静态转向可调式避振装置	
2.4.2.2 等半径的转弯稳定性 – 节气门输入 • 车载变化的特征函数 灵敏性和过程偏差 • 横向加速度引起的偏航速度变化 • 转弯行为信息	SZ	EHB（电液制动装置）EG-4　No. 43，56 EHB EF 第 3.4.1 章 真空辅助制动 电液制动装置-3 269/84 可调式避振系统 ISO 9816	
2.4.2.3 转弯稳定性-不平道路 （如单个障碍或随机凹凸障碍） • 不受干扰转弯的特征函数变化 • 车辆过程偏差 • 转弯行为信息	SZ	EHB（电液制动装置）EG-4　No. 43，56 EHB EF 可调式避振系统	

公理化设计（axiomatic design）是一种利用简单的矩阵方法来求解稳定系统及子系统的方法。随着客户需求的改变，分析与优化这些变化，将其融入产品的功能需求、设计参数中，最终通过工艺参数的改变来实现开发目标。

同样，质量功能展开（Quality Function Deployment，QFD）是一种在设计阶段应用的系统方法，它将来自顾客或市场的需求精确无误地转移到产品设计阶段的有关技术和措施中。简单地说，QFD 把客户的要求转换成相应的技术要求，帮助研发部门系统化地达成共识：做什么？什么样的方法最好？怎样最佳地完成工作？对员工与资源有什么要求等。

7.2.2 目标协议

车辆技术参数描述需要（或不需）满足的产品性能或特征，而目标协议指通过采取适当措施应该实现（或避免）的新车开发目标。制定、协调和追求产品目标一致性的过程就是目标协议。这也包括目标变更管理，以及监测和汇总目标完成的程度。目标管理起始于早期的开发阶段，终止于新车下线时（即所有开发目标都完成时）——是沿着新产品开发模型 V 曲线向上部分（图 1-7）。

总而言之，目标管理是把顾客需求从营销语言转化到设计语言的过程。例如，“为后排乘客确保膝部的空间”等要求可以转换成一个正式的目标，该目标由一个属性（如“L48 第二排膝部空间”）及其取值（如“9mm”）组成。由于汽车开发流程的决策必须建立在产品目标的基础上，这些目标必须满足目录上提及的需求。为了能够随时验证进展情况，目标应该是硬性指标，这意味着它们是定量的（例如，“速度从 100km/h 降至 0km/h 的车辆在干燥路面的制动距离是 35m”）。如果是不可量的软指标（例如，“车辆外观造型是动感和富有活力的”），必须由一套已商定的客观标准进行评价。如下所列，例如，轴距与车轮直径的比值、前（后）悬距离与车辆长度的比值以及车辆高度与宽度的比值等（图 7-2）。车辆目标必须服从多个边界条件，如通用或专门的法律法规、国家标准、竞争对手的活动、与其他改款车共享零部件的约束或现有的生产环境的限制等。

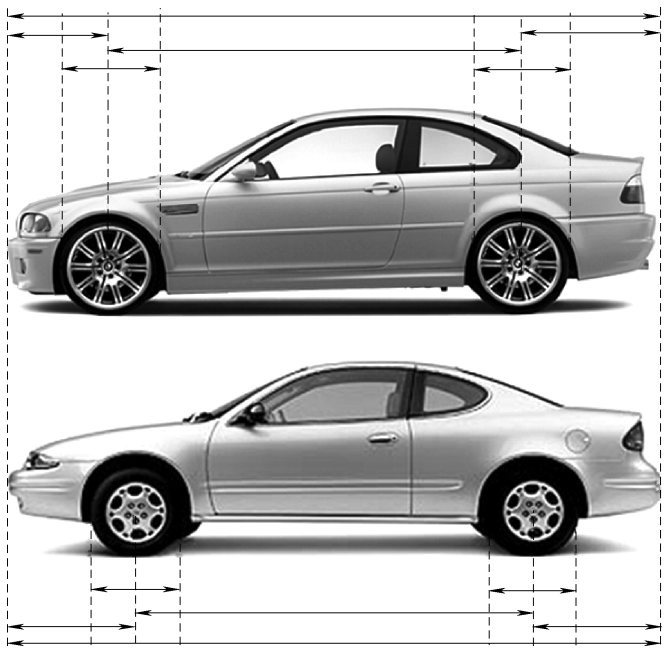


图 7-2 整车比例关系对软指标的评估

为了使新产品开发目标定义的汽车达到期望的竞争力水平，新车型的特征会与现有的竞争对手在战略性的产品特征（strategic product characteristics profile）方面做比较，这个比较结果会对竞争车辆所拥有的客户相关特征进行一个合理详细的评估。然后，通过决定主要竞争对手的不同等级来规划新车型的产品特征。

在战略性的产品特性方面，每辆车的特性都必须与其在市场上的不同等级要求的水平相关。大致可分为三个等级：

- 无/小差异（“ 可接受标准 ”）：对于这一特点，新车将与竞争对手提供相同的标准。
- 一般差异（“ 排名前三 ”）：这种特性对于新车的定位至关重要，虽然它与其他品牌没有明显区分，但将会和最有核心竞争力的车型位于同一区段。
- 明显差异（“ 最佳等级 ”）：这种特点对构成品牌形象很重要，并有望比主要竞争对手更好。

从形象上推导个体目标可能形成技术和（或）经济上的争议（如“行李箱容量达到

400L”与“L48 第二排膝部空间为 9mm”）。目标管理过程中的重要工作是解决目标冲突，如通过磋商讨论市场需要什么，设计师应该提供什么等问题。

从与现有竞争对手的对比中，可以推演出一款新车型是否在当今市场中具有竞争优势的预期。从新车下线到接下来的几年，为了确保新车型与竞争者在将来陆续下线的后续产品中仍保有优势，新车型的开发目标应与时俱进，根据当时的市场预期不断改进（图 7-3）。

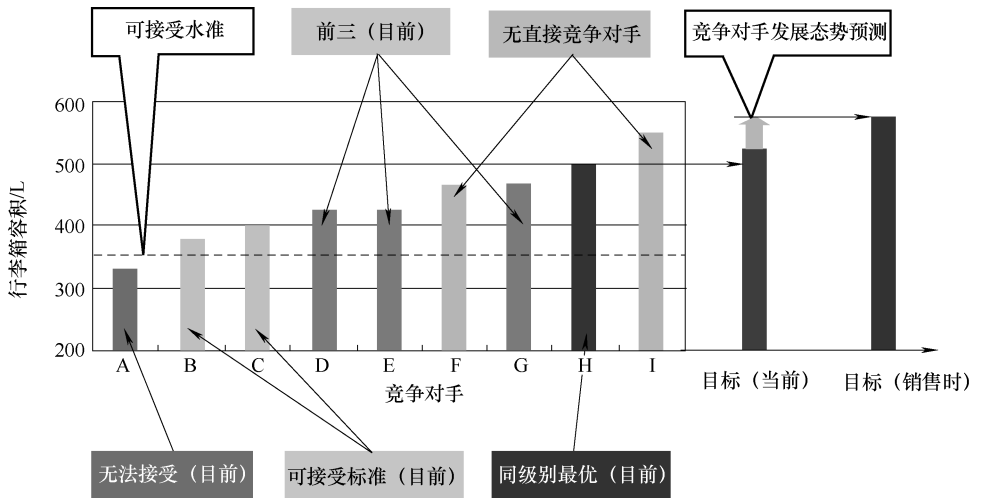


图 7-3　开发目标推衍过程（来源：宝马）

7.2.3　签发流程

与目标协议相关的整车功能和特性的成熟标志，就是通过整个验收过程，即参照新产品开发 V 曲线的最高等级过程（参照图 1-7）进行评价和验证。在新车型发布（下线）时，需要评估整车目标的实现程度，并根据新产品开发流程的重要节点制作文本，例如：

- 目标框架确认；
- 商业计划确认；
- 目标协议；
- 概念验证；
- 功能验证；
- 产品验证；
- 新车下线验证；
- 工艺能力验证。

对于所有整车开发目标，将通过使用一个翔实的指标确认体系，评价和量化完成预期目标的程度（图 7-4）。

对于早期阶段的签发，新产品与开发目标不会有很大的实际偏差，但应在汽车开发流程中特定节点上，及时地与预期目标进行偏差对比，获得整车开发的成熟度，并指出所需的纠正措施。

	评价结果	后　果
10	杰出	整体超过期望
9	优秀	轻微超过期望
8	非常好	充分满足期望，100%满意
7	良好	轻微偏离标称规格，少量客户反映问题
6	勉强合格	暴露明显的问题，未能完全满足顾客期望
5	不满意	有些条款需要修改
4	有纰漏	导致客户失望，需要紧急赶赴车间现场处理
3	十分不满意	顾客不满意率高
2	失败	顾客极度不满意，威胁采取法律或者公共行为
1	危险，或者车辆无法获得形式登记	未能满足安全要求

图 7-4　整车开发目标量化评定表（来源：宝马）

7.3　设计问题管理

如果新产品开发流程中车辆的功能或性能测试结果与开发目标不符，那么这种不符合称为**设计问题**（design problem）。从系列开发阶段开始，各种问题被罗列出来，并通过问题管理（problem management）机制着手处理。通常情况下，各种典型的问题是在整车集成过程中发现并被反映上来的：一个典型案例是整车几何集成中发现零件装配空间干涉（图 5-6）。另外在生产集成中发现不合理的生产工艺（参见 16.1 节），如一个螺栓不能使用电动工具进行准确安装。然而，大多数的问题是在功能集成时才被发现并反映上来的，并且这些问题也指示了产品未能满足的功能目标。功能问题可能出现在整车功能开发的各个环节（参见本书第二部分）。若一次整车碰撞试验失败了，那可是这种功能测试结果不符合有关法律法规的最糟糕情况。

当一个问题被反映上来，它将被提供给问题管理系统，并进入正式的问题解决流程。在这里，每一个问题的解决状况可根据清晰的流程图去跟踪，例如：

- 一级：问题被发现、确定并登记在案。
- 二级：问题的相关负责人已经找到：问题评估进程已经开始。
- 三级：完成问题分析；问题的发生原因已经查明。
- 四级：避免问题复发的措施已经明确并确认：所需零件和（或）工艺变更已经通过核准并公布。
- 五级：避免问题出现的措施已经实施：变更的零件和（或）工艺能力已经确认。
- 六级：问题消除：有效的解决方案得到确认。

问题管理的首要任务是确保每一个反映的问题都能尽快得到彻底解决。为此，进展情况会定期地被检查。就绝大部分而言，出现的问题是开发过程中的正常组成部分，并且会被主

管设计师当作他们例行工作的一部分来解决。人们常见的误解是：一个设计问题的危险程度总是跟它自身的风险程度相关。但高风险问题一般都会得到管理部门的极大重视，紧接着会被尽可能快地解决。而相关经验表明：表面上看起来复杂性较小的问题如果没能尽快地解决，那么它们可能转变成非常关键性的问题。如果问题的责任没有搞清楚或者问题没有认真地对待（参见 5. 2. 1 节），那么通常会发生上述问题。

一个可以检查出时间紧迫问题的有效方法，是通过与一个常用时间轴来比较它们之间的进程状态，这个方法代表着一个标准的问题解决流程。图 7-5 表示的就是这样一个时间轴的例子。这个图表明，一个在出现当天就需要被报告上去的问题（一级），会有一个问题主管负责人在 4 个工作日之后被指定去解决（二级），发生原因应该会在 20 天后知晓（三级），再一个 20 天后将采取适当的措施加以确认（四级），实施效果（五级）能在其后的 20 个工作日中显现出来，这取决于问题是否发生在准确的阶段（如测试首个原型车）。这样，一个问题的解决周期，从出现到确认消除（六级），大概需要 15 周。

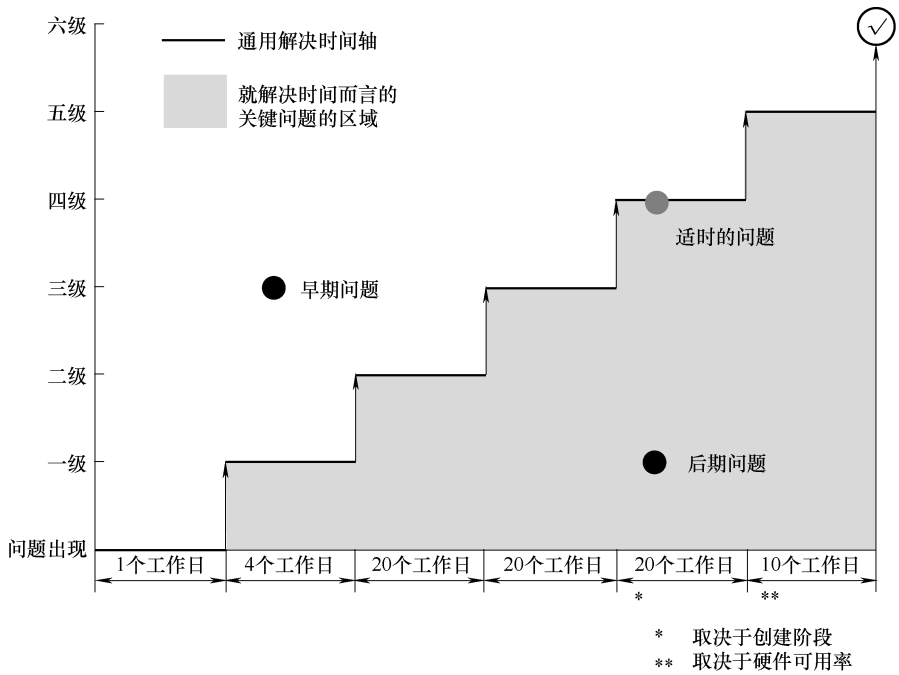


图 7-5　解决问题的标准时间轴

为了识别时间紧迫的问题，所有汇总问题的进展状况都需要对照时间轴进行定期检查。后期问题（就像在图 7-5 右下角标明的那一点）被报告到管理部门，会启动应急响应措施。这种问题解决流程的弱点是，有问题时只能在上报后才能启动第一级预案。如果出现的问题无法确认，而延误上报，就会导致问题未能解决且事态逐步升级。

同时，在一个新车型项目中，所有问题的解决状况和进展程度，显示了这个新车型的成熟度以及开发流程的有效性。这些数据通过一个问题云图形式呈现出来（图 7-6）。

该问题云图给管理部门提供了很多重要信息，并可进行深层分析，例如：

- 在最初原型样车建模时上报的问题得到及时排除了吗？还是会在第二阶段中重新出现？

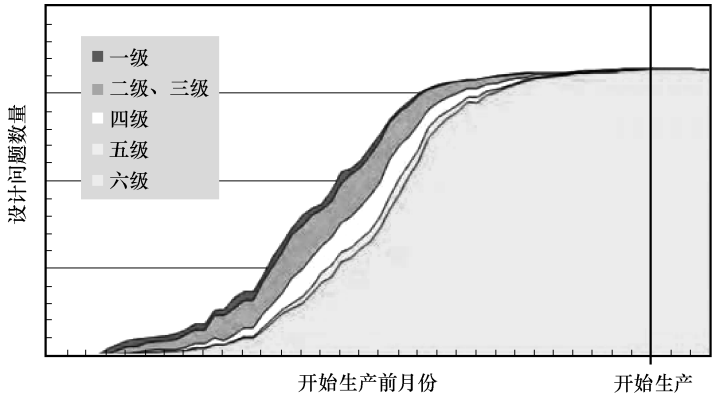


图 7-6　问题解决状况和进展云图

- 该项目与其他同类项目相比，解决问题是更快还是更慢？
- 在问题排除方面，某个零部件开发中心是否比其他开发中心慢？
- 未解决问题的总数是在增加还是在减少？

在系列开发的后半周期，出现的问题尤其重要。此时，产品需要成熟和稳定，相关测试只是为了确认产品的状况，而不是带来更多额外的问题。相比问题的解决速度（relative problem solving speed）是用于评估上述状况的一个实际可行的指数，它是根据在一个确定时段内所解决的问题数量与该时段内报告上来的问题数量之比计算出来的（图 7-7）。图 7-7 可以周期性地与已经实行过的早期项目的设计进程进行比较。

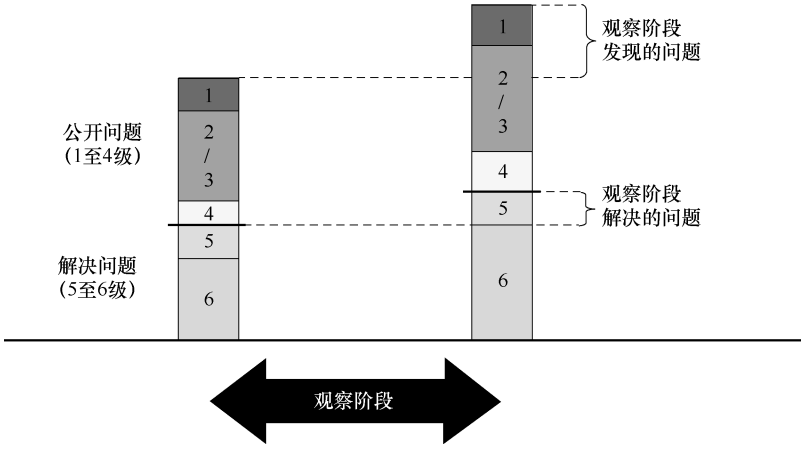


图 7-7　相对问题的解决速度

7.4　签发与变更管理

7.4.1　产品签发

任何零件设计工作的终点就是产品签发，产品签发是关于零件的明确描述和部件文本发布（包括材料、油漆、皮革、布料、表面或软件）。一个贯穿汽车零件到整车开发流程的各

种层次的签发是与项目关键节点耦合的，并且指出了零件的成熟度：

- 在概念设计阶段，计划签发（plan release）始于项目之初，是所有计划活动的起点。计划签发是根据目标协议，包含预期的零件系列化生产规划。特定零件的几何特性被冻结，并在共享设计工作平台上公开，以便所有涉及项目的设计者都能共享。
- 当开发设计过程已经足够成熟可创建和测试车型模型时，测试签发（test release）是获取所需硬件和软件的前提条件。测试签发是为每个原型构建组单独进行的，并且能够专门有效地针对某一特定的车型或测试程序（如一个特定的碰撞试验）。
- 当一个零件设计已经足够成熟，达到批量生产的要求时，就可以进行预先签发（preliminary release）。预先签发是订购、设计和制造系列化生产设备的前提条件。因为系列化生产的交货周期变动很大，所以预先签发通常分为早、中、晚三个签发组。
- 最终的签发层次是生产签发（production release），是被设计零件受法律约束的文档。生产签发基于样车和预产化车辆测试的基础上。

汽车零部件研发中心（COCs）的设计者（参见 1.3.2 节）为这些签发承担个人与法律责任。

7.4.2　设计变更

设计变更促使了工程的进步。产品开发是在不同层次上进行的一系列“设计—测试—评价—变更”的循环过程。然而，设计变更的原因和对整个产品的冲击，在不同开发阶段来讲有很大的差异：

- 在初步概念阶段，设计变更是受期望和欢迎的。在这个阶段，设计者为他们的解决方案奠定了几何基础和技术基础，而且早期的变更通常能够提高整车概念上的质量。这一阶段中的设计变更仅仅意味着修改二维或三维 CAD 模型。人们期望设计人员更改零件设计，直到获得大家一致认可的车辆概念。
- 在系列开发阶段之初，当最早的样车模型制作并测试完毕时，较之设计变更的数量，设计变更的严肃性才是概念质量和成熟度的指标。这个阶段的设计变更是期望对零部件而不是对整车概念的优化。当样车模型和零件必须修改时，这些设计变更需要新的测试签发，从而导致额外的成本。
- 首次原型样车制作的目的是为了加深印象，以利于新车型达成开发目标；而第二次原型样车制作是为了验证新车型开发达成了预期目标。进行较大设计变更的时间已经不够了；此时，预订的大量长周期批量生产装备已经开始制造了，而且明显的设计变更可能需要重新进行预先签发，这就意味着需要花费大成本来修改这些批量生产装备。
- 在新车型下线阶段，当预发布车辆已经进行小批量生产时，变更只能局限于个别零件工艺的细微改动。在这一阶段，任何较大的修改会直接威胁到新车型的计划投产日期，并且需要更改加工设备与工装，会导致高额成本。
- 投产之后的设计变更会对物流系统和制造系统产生干扰，因此代表着产品质量风险。在批量生产过程中，任何故意的设计变更（如额外的车辆特征）、质量或成本改进，都与批量生产之前的技术评估和财务评估紧密相关。

例如，年度车型套件可能包括需要综合设计变更和验证措施等新选项（特别是新的发动机）。问题由质量管理部门上报，顾客或有关顾客的测试也产生不断的质量改善所引起的

设计上的变更，这些改变（如果可能）被收集并引入系列生产中，一年做出更改一两次，以尽可能减少验证和组织的工作。成本改进措施可能不仅是简单的技术优化或者材料改变，可能还包括改变某些零件的供货商，一个距离较远的供货商被当地的供货商取代，来降低生产和（/或）后勤成本。

- 当一些零件被生产出来仅仅作为服务和修理的备用部分时，生产终止（EOP）之后也有可能发生更改。随着生产终止之后产量显著下降，大部分零件制造商减少了生产设备，这可能会引起必要的零件更改。

在新产品开发流程的不同阶段，设计更改的后果是很难预料的，举例来说，将车身面板的厚度更改一下，可能意味着只是改变了一个三维 CAD 模型或者一个实际零件的某项属性，也可能会导致重新进行一次碰撞试验［这意味着须重新提供一辆（组）原型样车］，或重做冲压模具，改变零件供应商，甚至向车间添加额外的设备，有很多种因素可使得设计变更引起产品成本增长（见图 7-8 底部的线条）。显而易见的是，必须在概念阶段做好主要设计工作，使得产品尽快成熟，可以把后期更改的风险和相关成本风险降到最小。这些前期工作环节包括较早使用模拟仿真工具，以及被称为质量功能展开（QFD）的概念质量改进方法（参见 7.2.1 节），或者潜在失效模式及后果分析（FMEA）（参见 16.2 节）。图 7-8 反映了在新产品开发各个流程阶段中采用各种设计方法时设计变更数量和分布所带来的设计变更成本。

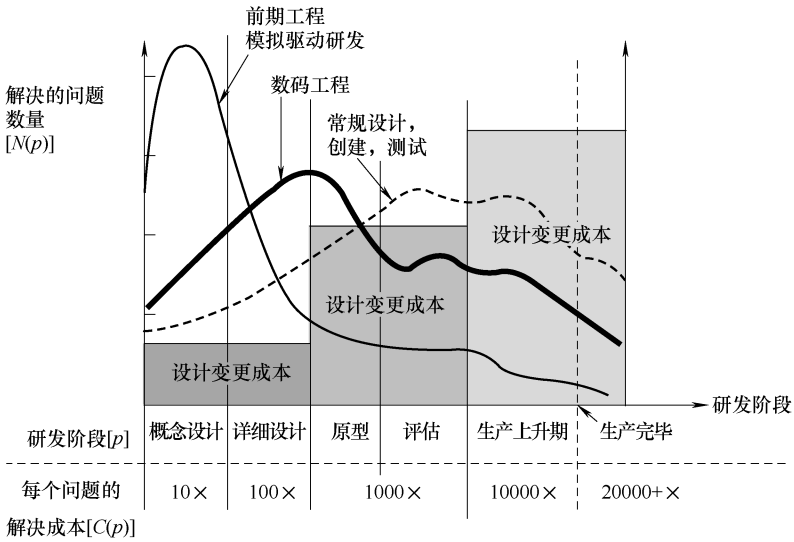


图 7-8　前期不同设计理念带来的设计修改成本

7.4.3　工程变更管理

在车辆项目各个开发阶段，所有汽车零部件、加工设备和工装等技术特性之间是相互依存的，从而使得该“产品—生产—系统”呈现越来越复杂的关系。这是在一个包括产品、工艺开发、物流和生产的高度同步工程环境中，所有的工程设计更改必须经过申请、综合性评估和各方沟通交流等环节后，才能签发与实施的原因。因此，**工程变更管理**（engineering change management）是贯穿车辆整个生命周期，经过识别、规划、控制、制作文档、沟通交

流，最后才决定实施更改的过程。

德国汽车制造商协会（VDA）已发布了针对数字化产品数据变更管理的综合性目录（行业标准 4965）。图 7-9 为整车集成流程的各个阶段和关键节点。

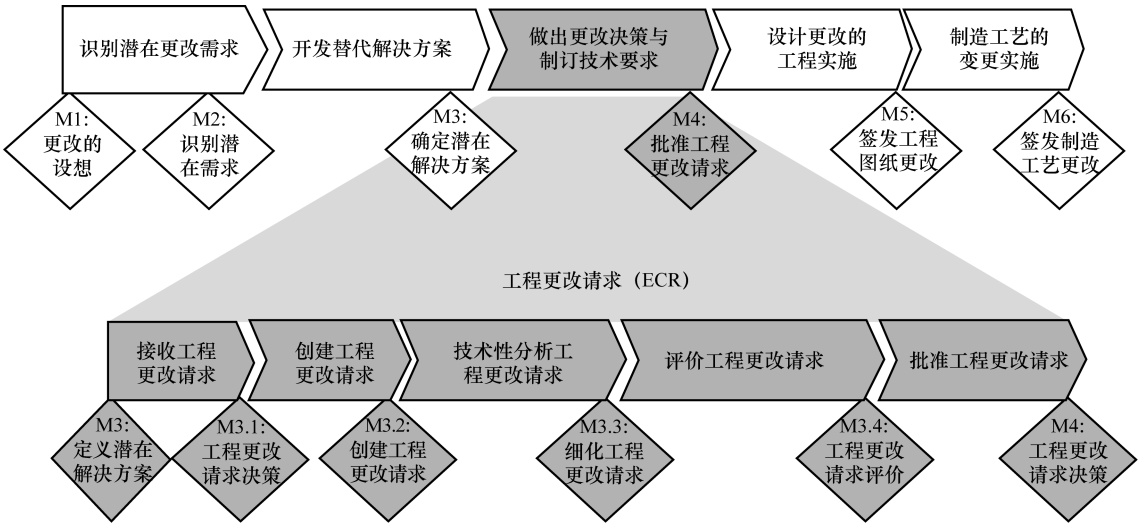


图 7-9　工程更改请示的各个阶段及关键节点

7.5　质量管理

7.5.1　质量定义

在产品开发过程中，像“质量”这样饱受争议和讨论的词不多。根据下列来自国际质量专家的个人定义，或许能隐隐看见有关质量争议的范围。

- 符合需求。
- 适用性。
- 产品（或服务）满足甚至超过顾客的期望。
- 产品投入市场后对社会造成的损耗。
- 特定产品符合设计和技术要求的程度。

当今，ISO 9000—2015 标准给出了一条被广为接受的定义：质量是一个产品或服务能够满足规定和隐含的所有特征与特性的总和。所有的质量定义都有一个共同点，就是顾客对产品的满意度。在汽车行业里，这种满意度可以被分成以下三个主要方面。

- 概念质量：新款车型的概念（包括价格）应吸引目标顾客群体，并提供足够的亮点超越竞争对手。
- 生产质量：在汽车零部件制造、组装并运往目的地后，顾客接收到的实车应当符合设计规格，功能齐全。
- 长期质量保证或可靠性：即使已服役多年，汽车仍应保持它的功能。

7.5.2 产品交付前（内部）质量评估

如3.2节所述，在一款新车型（系列）开发的概念阶段，其核心工作是预见未来消费者的需求、期望和感觉，并从中获得一个协调一致的新车概念。在概念阶段末尾，既定的整车开发目标必须与管理组的期望一致，保证在汽车下线后能最大限度地吸引消费者。这个阶段，由于没有真实的消费者去表达对这款车的满意程度，整套的既定目标完全是由质量所决定的——显然这时质量的定义是非常主观的。在系列车型开发阶段，评估整车质量时，这套既定的开发目标都可以运用在评估过程中。坦率地讲：产品交付前所有的质量评估仅仅是制造商的想法，而非消费者的实际需求。

在系列开发阶段，功能集成应确保前面提到的车型概念以及那些被设定的功能和特性能在最终设计时实现。生产集成应确保生产在由设计转化为实车的过程中没有质量问题，其后的整车测试应代表消费者的需求。在开发过程中，汽车的质量是由质量尺度来衡量的，而质量尺度是在质量监控时通过质量缺陷加权计算得来的。根据质量监控的程度与范围，可以定义多种质量指标。其中有一种方法就是对一辆车不同部分的静态审核：

- 白车身：外部间隙和面差。
- 外表面：油漆和面板光洁度。
- 内外饰：装饰适用性。
- 发动机舱：部件适用性。
- 底盘：部件适用性。

为了判断汽车在运行过程中才可能出现的缺陷，必须进行动态测试。例如：

- 系统测试：检查所有电子系统的功能（见6.6.2节）。
- 性能测试：噪声、振动和舒适性。
- 性能测试：动力性、操控敏捷性。
- 渗水测试：淋雨试验无漏水现象。

在这些不同测试中，受过训练的试验人员会按照所需的技术指标检测汽车的每个零部件。如果测试结果与技术指标有所差异，试验人员会根据整车开发目标量化评定表评估缺陷的严重程度（图7-4）。缺陷越严重，质量指标（不满意程度）越高。

由于试验人员是针对实车检测各种开发要求的符合程度，质量指标表示一辆车在某个特定开发节点的成熟度。除了观察多个不同汽车开发项目的需要，质量指数可以评判新产品开发流程各个阶段的特征：当评估首款原型样车（组）时，通常质量指标不满意程度是很高的；而在后来的原型样车（组）、小批量试制与投产阶段，由于产品与工艺的不断改进，质量指标不满意程度呈现阶梯式下降趋势，直到质量指数达到批量生产的水平（图7-10）。在一个正在进行的汽车开发项目中，期望值可以与实际质量指标对比，确保新产品质量获得持续改进。

在批量生产中，通过日常质量检测得到的质量指标是整个质量控制环节中的控制变量。而在销售给顾客以前，相关质检人员随机从装配流水线中选取一辆车，然后根据公司的产品质量标准评判这辆车的质量。为了使所有整车制造商各个生产基地都有相同的质量等级，需要对审核员进行专门培训，规范对质量目标的管控。

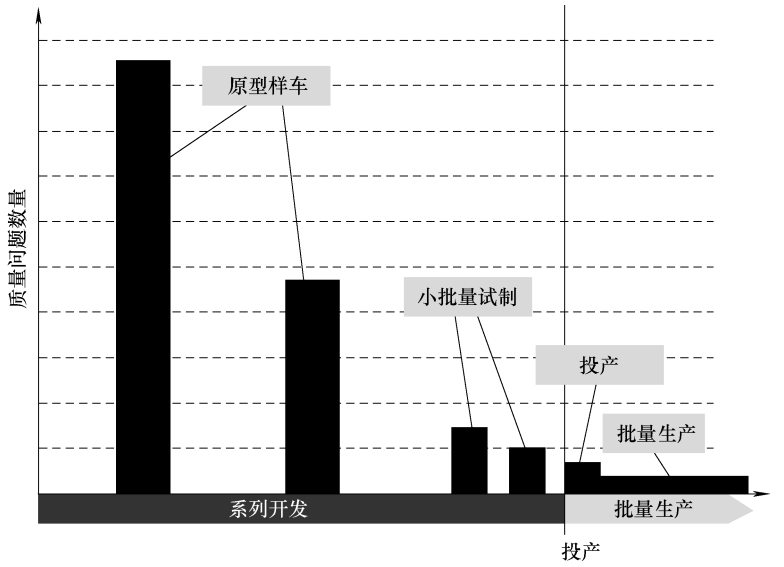


图 7-10　新产品开发流程中整车质量不断改进过程

7.5.3　产品交付后（外部）质量评估

如前所述，实际能够满足消费者需求的汽车质量只有最终交付到顾客手中时才显现。在启动批量生产后，汽车上市，汽车制造商迫切想知道消费者对其产品的感知如何。获得消费者反馈的渠道主要有三个：通过经销商网络反馈消费者投诉意见、汽车报纸杂志报道和第三方非营利性组织的消费者质量跟踪调查。

1. 消费者意见投诉处理

最直接与消费者打交道的是汽车经销商，因为顾客去那儿买车，进行售后服务或维修。经销商直接从消费者那儿取得的反馈信息中，有积极的，也有消极的。经销商收集消费者的意见，然后开发中心的质量部门经过整理和分析，据此获得汽车质量的全面情况。

与下述两种反馈方式相比，这种反馈方式有一个重要的优势，就是所获得的信息仅限于公司内部人员，未对外界宣传报道。然而这个方法的一个劣势就是收集到的信息几乎全是产品的消极经历。通过抱怨这种方式没法收集和分析消费者真正喜欢这辆车的原因。

通过经销商收集来的有关汽车质量印象或多或少是模糊的。消费者反映的问题严格意义上并不都是质量问题（如使用不当或者粗心），由于质保期内的维修保养费用都是完全由整车制造商支付的，一些经销商通常将这些问题仅作为保修项目而不引起重视。

2. 汽车杂志和相关新闻报道

当新车型上市时，通常举办专场营销造势活动，让来自汽车报纸杂志的记者，以及汽车零部件供应商进行试驾体验。因为大部分的记者都是有着多年经验的行家，所以他们关于汽车的评价和写的文章对制造商来说包含很重要的信息——尤其是汽车的新闻报道通常都是在首款新车交付时发布的。如果全球范围的汽车出版物都对这款车做出评估，即使一家（或

多家）汽车报纸杂志对某款新车型有良好（或不好）的倾向性评价，都会对该品牌汽车造成正面（或负面）影响。

举行新闻发布会和新闻评论，这对新车型的质量反馈仅仅是一部分，最主要的目的还是尽可能引起公众对这款车的关注，并通过这些宣传使公众对新车的认知产生深远的影响。最著名的典型案例是瑞典 Teknikens Värld 杂志在 1997 年发表的一篇文章，其中说到一新款奔驰 A 级轿车在普通换道操作时发生了翻车（后来称为“elk test”测试）。当 Teknikens Värld 杂志报道这个问题时，戴勒姆-奔驰公司试图辩解。然后当这个事众人皆知时，戴勒姆-奔驰不得不对车身稳定控制系统进行改进，这花去了数百万欧元的额外开发成本，并且停产了三个月。

3. 顾客满意度年度调查

外部质量调查一般是由市场调研机构或者第三方非盈利性消费者组织进行的。这些调查从抽样内容（如概念质量是否包括其中）到抽样时间均各有不同。表 7-2 给出了常见汽车调查机构的综述。

表 7-2 著名外部质量调查机构列表

名称	描 述	抽样内容	国家和地区	抽样时段	间 隔
NCBS	新车车主调研	销售、产品、概念、可靠性	欧洲、日本	3 个月	每年一次
IQS	新车质量调研	可靠性	美国	3 个月	每年两次
APEAL	汽车性能、运行和设计调研	概念、设计	美国	3 个月	每年一次
ECSS	欧洲消费者满意度调查	服务、产品和可靠性	欧洲	2 年	每年一次
QAS	质量监督调查	可靠性	欧洲	1 ~ 3 年	每年一次
VDS	汽车可靠性评级	可靠性	美国	3 年	每年一次
CSI	售后服务满意度指数调研	服务、产品	美国、日本	1 ~ 3 年	每年一次
ADAC	全德汽车俱乐部故障统计	故障率	德国	3 ~ 6 年	每年一次
TUX	强制性技术检测	操纵安全性	德国	3 ~ 11 年	每年一次

北美地区比较著名的顾客满意度年度调查有初始质量调研报告（IQS）和汽车性能布局调查（APEAL），这两者均是由美国市场调查机构 JD Power and Associates 进行调查的。

新车质量调研报告（IQS）是基于车主报告其在购车 90 天后遇到的问题，通过制造商、装配工厂、车型和开发平台等途径，获得的关于新车质量的深层次诊断信息。该调查以每百辆车的问题数量（PP100）为标准进行测评，内容分为八大类别：①车身外观；②发动机及变速系统；③配置、操控和仪表板；④音响/娱乐设备和导航系统；⑤座椅；⑥空调系统（HVAC）；⑦车身内饰；⑧驾驶经历。八大类别中共包括 228 个问题，有 300 多个问题细节，综合得分以每百辆车所出现的问题（PP100）来衡量，分数越低，表明发生故障的频率越小，质量也越高。

汽车性能、运行和设计调研（APEAL）主要确认这款车最吸引消费者的方面。车主对目录中 100 多种车辆特性进行评估，其中包括驾驶和操控性、发动机和传动系统、舒适度和便利度等。图 7-11 显示了 2017 年 APEAL 调研结果排名。

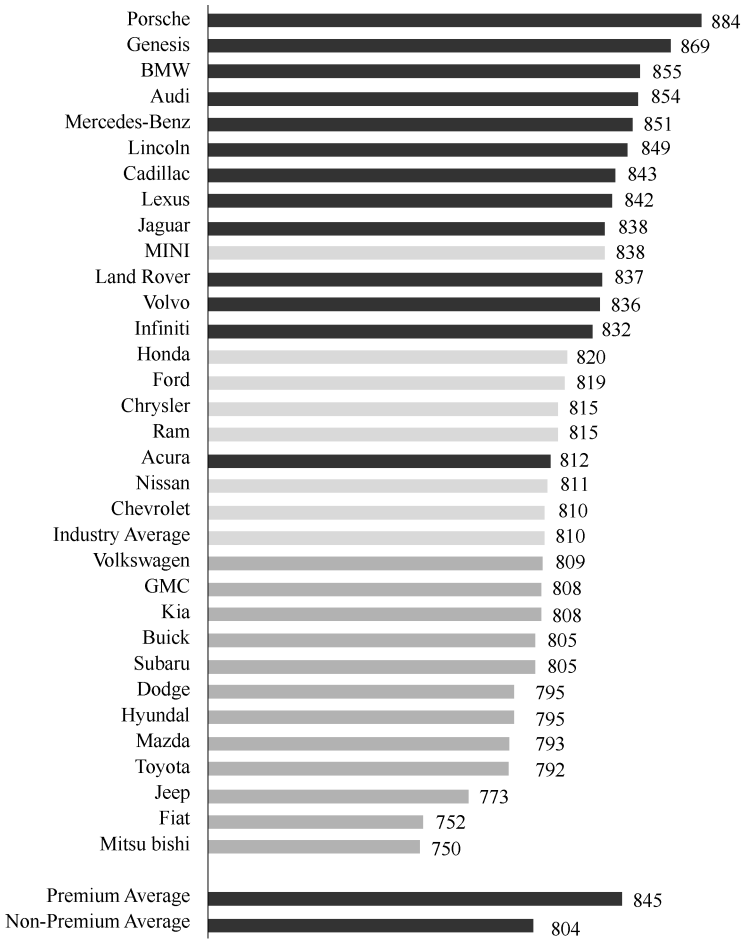


图 7-11　2017 年 APEAL 调研结果排名

7.5.4　全面质量管理体系

全面质量管理（Total Quality Management，TQM）是指一个组织以质量为中心，以全员参与为基础，目的在于通过顾客满意和本组织所有成员及社会受益而形成长期成功的管理机制。其特点是：

1）全面性：是指全面质量管理的对象，是企业生产经营的全过程。

2）全员性：是指全面质量管理要依靠全体职工。

3）预防性：是指全面质量管理应具有高度的预防性。

4）服务性：企业以自己的产品或劳务，满足用户的需要，为用户服务。

5）科学性：质量管理必须科学化，必须更加自觉地利用现代科学技术和先进的科学管理方法。

全面质量管理（TQM）的两大支柱：

1）成本控制及时全面。浪费在传统企业内无处不在：生产过剩、零件不必要的移动、操作工多余的动作、待工、质量不合格或返工、库存等。消除生产流程中一切不能增加价值

的活动，即杜绝浪费。

2）持续改进自动化。持续改进是另一种全新的企业文化，实行全面质量管理，由传统企业向精益企业的转变并且享受精益生产带来的好处，贯穿其中的支柱就是管理自动化。

所谓全面质量管理就是："通过全体员工的参与，改进流程、产品、服务和公司文化，生产百分之百合格的产品，让客户满意，从而获取竞争优势和长期成功。"作为一种管理思想，全面质量管理并没有一套统一的工作模式，因各国、各企业情况不同，贯彻TQM的方法和效果各不相同。就中国企业而言，主要通过ISO 9000的达标活动来实现质量的提高。

1. ISO 9000质量管理体系（The ISO 9000 Standard Family）

在ISO 9000体系13中描述了最著名的质量管理系统，其中ISO 9001提供了合适的需求，该需求是处于设计和研发阶段的组织需要履行的，它想通过那些满足消费者期望的产品和服务来获得消费者的满意度。例如，下面几个要求：

- 组织中所有关键流程一致性，包括每个流程需要检测和测量的关键点；
- 通过检测、测试和分析控制流程，确保产品质量达到目标；
- 机构为每一个产品制定质量目标——必须规范测量并且能形成文件；
- 购买的零件、部件和服务需有明确要求；
- 确定消费者需求，并与消费者就有关产品信息、咨询、订单、投诉等问题进行沟通；
- 每一个新产品开发过程中，对产品各个阶段进行合适的测试，以确定开发阶段并形成文件；
- 通过内部审核及会议达到一致的性能评价，以检查该质量管理系统做了哪些改进；
- 处理实际的与潜在的或内外部不一致情况的文件化程序；
- 在组织中，每一个管理人员都需熟悉控制质量文件的文件化程序，并且能在组织中交流。

实际的质量管理系统记录在质量手册中，这套系统是管理层的正式声明，各个层次员工都应当理解遵循这套系统。该系统包括每位员工想设法达到的测试目标。质量体系必须进行定期审核，以确保和提高其有效性。质量体系的实施包括提供配套的基础设施、原料、信息、装备、测量和检测装置以及环境条件。

ISO 9001流程模式如图7-12所示。它表明一个企业的质量管理系统涉及消费者的需求以及获得消费者的满意程度。

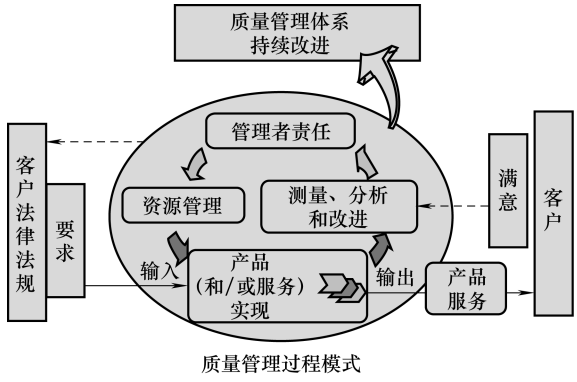


图7-12 ISO 9001流程模式

由于ISO 9000是通用标准，它提出的质量管理系统并不是为汽车行业量身定做的。鉴于这个原因，ISO/TS 16949：2002是对ISO 9001的说明，这已得到欧洲和美国主要汽车制造商的一致认可。ISO/TS 16949：2002包含了ISO 9001：2000的全部内容以及汽车行业的特殊需求。

2. 汽车行业质量管理体系（TS 16949）

汽车制造是一项很复杂的系统工程，整个汽车是由上万个零部件装配在一起的组合件，涉及冶金、化工、纺织、电工、玻璃、塑料、橡胶、轻工等行业。因此整车制造商对零部件供应商的质量依赖性很强，需要一种模式来保证零部件供应商的产品和服务质量。

为适应汽车工业全球采购的需要，减少零部件及材料供应商为满足各国质量体系要求而多次认证的负担，降低采购成本。国际汽车特别工作组（IATF）以及国际标准化组织的质量管理和质量保证委员会及其分委员会（ISO/TC 176）的代表，在以 ISO 9001：1994 版质量体系的基础上，结合 QS-9000、VDA6. 1、EAQF（法国）94 和 AVSQ（意大利）95 等质量体系的要求，制定了 ISO/TS 16949 技术规范（Technical Specification），通过 ISO 技术委员会 2/3 成员国的投票同意，并已于 1999 年 1 月 1 日颁布发行。

目前 ISO/TS 16949 仍是一个技术规范，其与国际标准的差异是，它必须通过 ISO 技术委员会 90% 成员国的投票同意，才能决定其是否可转化为国际标准，而每隔三年 ISO 技术委员会要对其进行一次评审。

ISO/TS 16949 技术规范符合全球汽车行业中现用的汽车质量体系要求，并可避免多重认证审核。同时可以建立一个美国及欧洲都可以接受的单一质量体系文件和认证注册方案，避免企业编制多重质量体系文件和重复认证注册的困扰。

7. 5. 5　质量成本

最佳的汽车质量是大家所期望的，但是每个汽车制造商面临的大问题是：成本包括哪些？为给出正确的答案，必须获取并查看因质量问题引起的整个成本概算。从本质上说，质量的总成本可以分为两个基本的方面：合理成本和不合理成本。

不合理成本（也称为低质量成本）可以定义为如果产品、工艺和系统是完美的，这样的成本是可以被消除的。根据不合理成本产生的原因，它又可以分为：

- 内部损失成本：在交付给顾客前，汽车制造商的设备引起的内部损失。典型的例子是废品、返工、重新设计、延误、匮乏、失效分析、再测试、矫正工作、等待、停工、租赁、延时、缺乏灵活性等。
- 外部损失成本：在汽车交付给顾客后引起的故障，经常是为满足顾客需求或用户技术要求的结果。典型的例子是召回、修理、投诉、担保、退货、替换、顾客信誉丧失、销量减少引起的损失等。

为了使得产品质量与开发目标相符，必须采取一些质量保障措施。由此导致的成本称为合理成本（或高质量成本）。根据何时采用质量保障措施，合理成本又可以分为：

- 预防成本：避免缺陷所做的积极措施，包括预防性维护。典型的例子是质量规划（预防方法、组织结构和进程的重组、产品复核等）、文档编制（工作指导手册、技术指导手册等）、培训（意识、方法和工具、条例和规章）、供应商评估、防错、能力评估等。
- 检测成本：通过有效的检测方式发现缺陷所做的反应措施。典型例子是在线及最终检测、检查和测试已购买的零部件、现场测试、（内部和外部）质量审核、规划和监控（汽车、装备、基础设施、人员等）以及测量仪器的定期校正等。

经验表明，评估和预防是减少总质量成本的关键杠杆。阿曼德·费根堡姆（Armand V. Feigenbaum）首次提出了实施全面质量管理可最终减少总成本，并提出了应将工作重点从不

合理成本和检测成本转换到预防成本的新观点，图 7-13 说明了全面质量管理（TQM）实施过程四个开发阶段中的四种质量成本要素比例。

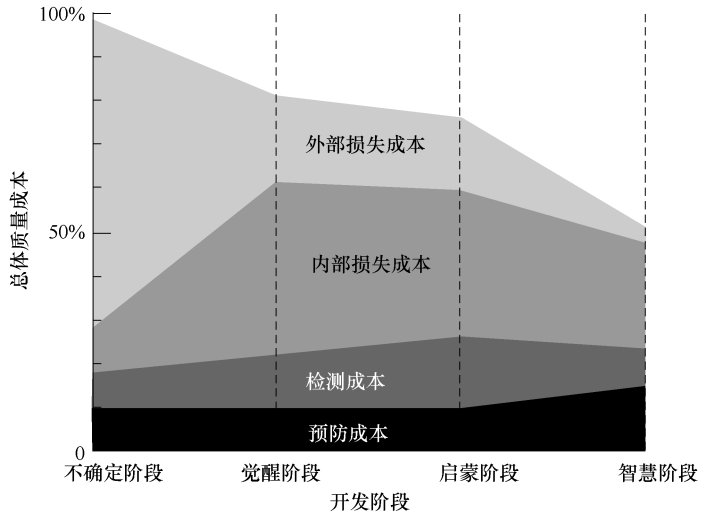


图 7-13　全面质量管理实施阶段的质量总成本进展（数据来源：Educe）

目前，外部损失成本是汽车制造商面临的最大问题。所有的整车制造商努力降低保修成本和维护商业信誉。从长远来看，为了采取有效的前期措施减少消费者的投诉，需要一丝不苟地追踪和报道保险与信誉方面的问题，以及找到分析这些海量数据的适合方法。例如，宝马公司用一种分析方法，可以对每辆车的保险和信誉问题进行图解积分。一系列曲线表明了不同汽车服役年限对应于其生产日期的问题数量。然后采用一种特殊的算法产生一个对其保险和信誉情况的预测。图 7-14 所示为每百辆新车保险和信誉问题统计表。

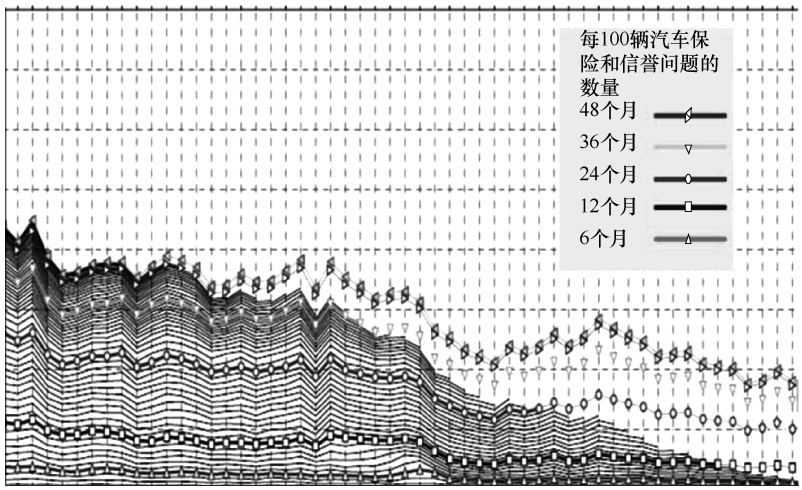


图 7-14　每百辆新车保险和信誉问题统计表

第2部分

整车性能开发与评估

第8章

汽车动力系统设计

《中国制造 2025》与《节能与新能源汽车技术路线图》正式提出制造强国战略，并将节能与新能源汽车列为重点发展的十大领域之一，总体上指明了节能汽车、新能源汽车、智能网联汽车技术的发展方向和路径。未来新能源汽车逐渐成为主流产品，汽车产业初步实现电动化转型。从现在到 2025 年将是汽车产业变革最为剧烈的几年。传统汽车节能减排要求越来越高，新能源汽车发展加快对技术要求越来越高，智能网联汽车将对整个产业带来巨大影响。

8.1 汽车动力系统分类

尽管汽车研发部门正在紧锣密鼓地将可替代性概念应用于批量化生产，但是当今内燃机仍是（在不久的将来继续是）乘用车的主要动力系统。所以，当今提高汽车燃油效率的关键点有两个：一是传统汽车节能减排，二是采用生物燃料和可再生能源替代方案等。

8.1.1 传统发动机节能降耗

尽管经历了将近 150 年的不断开发和优化，但是作为一种主流的发动机形式，内燃发动机在燃油经济性和排放方面依然存在着提升的潜能。而对这方面的优化涉及发动机技术和可再生燃油技术。

优化发动机核心部件和外围附件可以显著降低燃油消耗与相应的二氧化碳排放。这种做法的优势在于无须改动现有的汽车架构以及能源供给基础设施。

以宝马 530i 四门轿车为例，图 8-1 展示了降低燃油消耗率的若干关键技术：

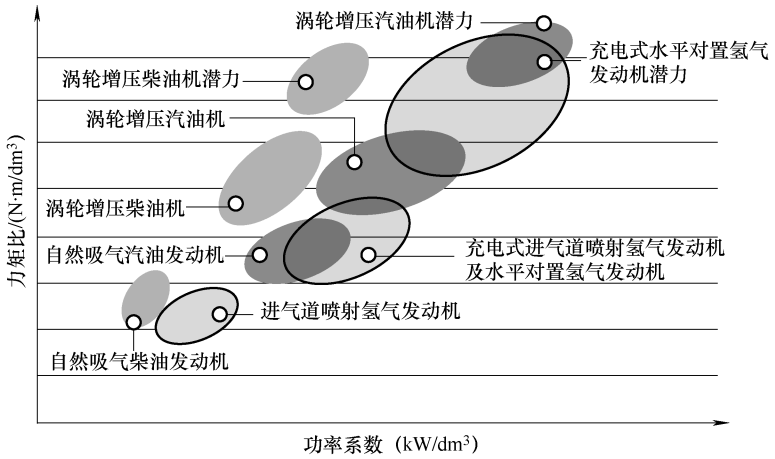


图 8-1 传统汽车发动机类型比较

- 可变配气相位的排气门驱动机构（Variable Valve Timing，VVT）。
- 连续可变进气门升程系统（Valvetronic）。
- 高精度燃油喷射技术。
- 轻量化（如铝合金曲轴箱体）。

8.1.2　生物燃料动力系统

生物燃料（biofuel）泛指由生物质组成或萃取的固体、液体或气体燃料，可以替代由石油制取的汽油和柴油，是可再生能源开发利用的重要方向。所谓的生物质是指利用大气、水、土地等通过光合作用而产生的各种有机体，即一切有生命的可以生长的有机物质。它包括植物、动物和微生物，不同于石油、煤炭、核能等传统燃料，这些新兴的燃料是可再生燃料。工业、农业、林业、一般家庭制造出的可生物分解的产物都可以作为原料。生物燃料有污染少、可再生、多样性等优势，受到全球各国的普遍关注，其多样性包括：

1）原料上的多样性。生物燃料可以利用作物秸秆、林业加工剩余物、畜禽粪便、食品加工业的有机废水废渣、城市垃圾，还可利用低质土地种植各种各样的能源植物。

2）产品上的多样性。能源产品有液态的生物乙醇和柴油，固态的原型和成型燃料，气态的沼气等多种能源产品。既可以替代石油、煤炭和天然气，也可以供热和发电。

但是，有一个“从油井到车轮”的分析，该分析总结了可再生燃料生产、销售和消费对生态环境的影响。分析表明，一些可替代燃料的生产（包括肥料和除草剂的使用）和运输需要更多的化石能源，并且产生的温室气体排放比等量的化石燃料还要多。生物燃料的另外一个消极影响是“与粮争地”，抬高了粮食价格，因为它使得许多国家和地区正改变成百万公顷土地的用途，专门种植棕榈、甘蔗和其他能够制造生物燃料的作物。

8.1.3　可再生能源动力系统

尽管对现有的发动机概念和混合动力系统的优化，可以显著提高汽车节能环保性能，但是有关零排放汽车、可再生能源以及能源安全的长远目标还是需要可替代传统动力系统的新概念。如今，主要有两种发动机形式可以实现零排放：氢燃料内燃机和电动机。基于这两种发动机形式，产生了相互竞争的三个概念以实现零排放汽车（ZEV），它们是：

- 氢燃料汽车：用存储在汽车上的氢燃料驱动汽车发动机运转。
- 纯电动汽车：用存储在汽车上的电能驱动电动机运转。
- 燃料电池汽车：通过燃料电池将氢转化为电能，驱动电动机运转。

但是，从可持续发展的角度，若只对上述汽车动力源狭义地进行评估和比较，并非完全代表汽车的燃油经济性和排放，还需要评估汽车全生命周期中对生态环境产生的全部影响，这些影响包括以下汽车全生命周期环节中的能源消耗和排放：

- 开发（如氢气罐爆炸试验产生的排放）。
- 营销（如处于市场营销的电动汽车比赛带来的消耗和排放）。
- 制造（如制造一个电池组所消耗的能量）。
- 运输（如飞机为运输来自海外供应商的电动机而产生的排放）。
- 报废（如在汽车报废时用于中和车内液体所需的能量）。

至于能源消耗方面的相关问题，它与汽车全生命周期无关，关键取决于它是否是可再生

能源。可再生能源包括太阳能、风能和氢能等。

8.2 传统汽车动力系统设计

传统汽车依靠发动机产生推进力，并通过变速器、传动轴、差速器等动力传动链传递到驱动轮。因此，有关车辆加速和牵引性能最重要的便是发动机、变速器和驱动轮轮胎等技术参数。

8.2.1 汽车发动机节能降耗设计

不同类型的发动机形成不同的驾驶特性。影响车辆性能的基本参数有往复活塞发动机的燃料类型和相应的燃烧过程（汽油或柴油）、气缸排列（直列、V 形、箱形）、气缸数（3、4、6、8、10、12）等。另外，决定发动机的性能和动态特性的因素，主要包括气缸体积、燃油喷射技术、进气/充电技术和排气技术。一个提高发动机性能的有效方法是涡轮增压技术（图 8-2）。涡轮增压的主要作用就是提高发动机进气量，从而提高发动机的功率和转矩，让车子更有劲。一台发动机装上涡轮增压器后，其最大功率与未装增压器的时候相比可以增加 40% 甚至更高。这也就意味着同样一台发动机在经过增压之后能够输出更大的功率。就拿我们最常见的 1.8T 涡轮增压发动机来说，经过增压之后，动力可以达到 2.4L 发动机的水平，但是耗油量却并不比 1.8L 发动机高多少，在另外一个层面上来说就是提高燃油经济性和降低尾气排放。

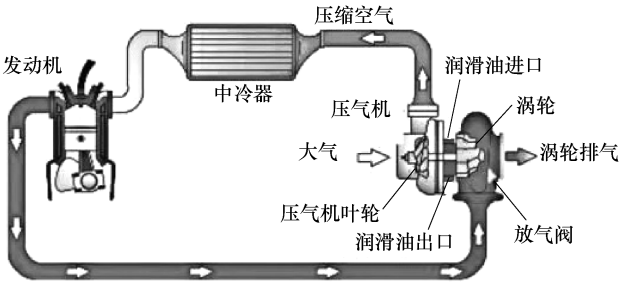


图 8-2 涡轮增压原理

一般来说，涡轮增压都是利用发动机排出的废气惯性冲力来推动涡轮室内的涡轮，涡轮带动同轴的叶轮，叶轮压缩由空气滤清器管道输送来的空气，使之增压之后进入气缸（图 8-2）。当发动机转速增快，废气的排出速度与涡轮转速也同步增快，叶轮又压缩更多的空气进入气缸，空气的压力和密度增大可以使更多的燃料充分燃烧，相应地增加燃料量和调整发动机的转速，就可以实现增加发动机的输出功率了。

按排气能量在涡轮中的利用方式，可以分为定压涡轮增压系统和脉冲涡轮增压系统两种。当空气被高比例压缩后会产生很高的热量，导致空气膨胀，密度降低，而同时也会使发动机温度过高造成损坏。为了得到更高的容积效率，需要在注入气缸之前对高温空气进行冷却。需要一个旁通阀和一个空气冷却器作为附加组件，将其连接到发动机舱，所以空气冷却器又称作中间冷却器（简称中冷器）。图 8-3 为一个四缸汽油发动机机械增压和涡轮增压的效果对比。

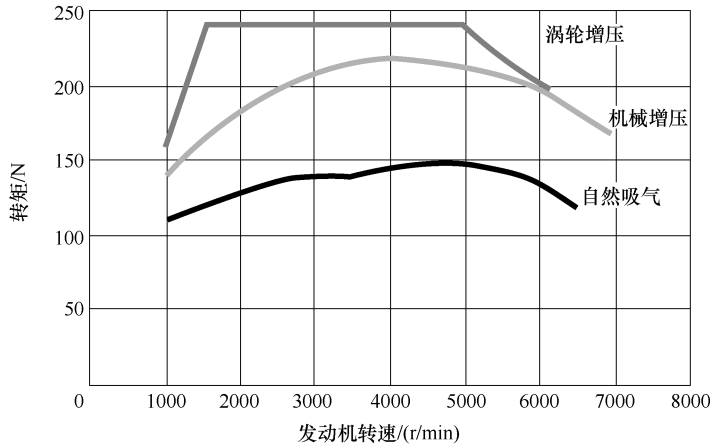


图 8-3　机械增压和涡轮增压效果对比

不过在经过了增压之后，发动机在工作时的压力和温度都大大升高，因此发动机寿命会比同样排量没有经过增压的发动机要短，而且力学性能、润滑性能都会受到影响，这样也在一定程度上限制了涡轮增压技术在发动机上的应用。增压器和涡轮机作为一个额外的旋转质量，对发动机响应会带来负面影响，故赛车发动机为了减少总转动惯量，多采用双涡轮增压器（Bi-Turbo）。

8.2.2　动力传动与变速器设计

汽车发动机的动力经离合器、变速器、传动轴，最后传送到驱动桥再左右分配给半轴驱动车轮，在这条动力传送途径上，驱动桥是最后一个总成，它的主要部件是减速器和差速器。

1. 变速器

变速器（Transmission）是汽车传动系统的主要组成之一。汽车的实际使用情况非常复杂，如起步、怠速停车、低速或高速行驶、加速、减速、爬坡和倒车等，这就要求汽车的驱动力和车速能在相当大的范围内变化，而目前广泛采用的活塞式发动机的输出转矩和转速变化范围较小。为了适应经常变化的行驶条件，同时使发动机在有利的工况下（功率较高、油耗较低）工作，在传动系统中设置了变速器。可选的变速器种类包括：

- 手动变速器（MT）：包括离合器、踏板和变速器操纵杆。
- 自动变速器（AT）：利用行星齿轮机构进行变速，它能根据加速踏板位置和车速变化，自动地进行变速，而驾驶人只需操纵加速踏板控制车速即可。通常由液力变矩器、行星齿轮变速系统、换档执行器、液压操纵系统、电子控制系统五部分组成。
- 手自一体变速器（Tiptronic）：手动/自动可自由转换，自动调节发动机转速和档位，同时拥有手动变速器的驾驶乐趣和自动变速器的便利性。
- 无级变速器（CVT）：无级变速器（Continuosusly Variable Transmission，CVT）技术，是采用传动带和工作直径可变的主、从动轮相配合来传递动力，可以实现传动比的连续改变，从而得到传动系统与发动机工况的最佳匹配。常见的无级变速器有液力机械式无级变速器和金属带式无级变速器（VDT-CVT）。

• 直接换档变速器（DSG）：除了拥有手动变速器的灵活和自动变速器的舒适，更能够提供无间断的动力输出。该变速器有两组自动控制的离合器，在整个换档期间两组离合轮流工作，确保最少有一组齿轮在输出动力，令动力没有出现间断的状况。

最小切换时间是衡量一款变速器传动特性的一个技术指标。而传统的变速器变速换档期间，动力传递通常被切断，故从运动性或者性能角度来看，直接换档变速器（DSG）是最前沿的技术。在未来，为了进一步优化整车性能，变速器将与发动机进行个性化搭配。

2. 差速器

差速器是为了调整左右轮的转速差而装置的。汽车差速器主要由左右半轴齿轮、两个行星轮及齿轮架组成。功用是当汽车转弯行驶或在不平路面上行驶时，使左右车轮以不同转速滚动，即保证两侧驱动车轮做纯滚动运动。在四轮驱动时，为了驱动四个车轮，必须将所有的车轮连接起来，如果将四个车轮机械连接在一起，汽车在曲线行驶的时候就不能以相同的速度旋转，为了能让汽车曲线行驶时车轮旋转速度基本一致，需要加入中间差速器用以调整前后轮的转速差。

8.2.3 四轮驱动装置设计

四轮驱动，又称全轮驱动，是指汽车前后轮都有动力。可按行驶路面状态不同而将发动机输出转矩按不同比例分布在前后所有的车轮上，以提高汽车的行驶能力。一般用 4X4 或 4WD 来表示，如果你看见一辆车上标有上述字样，那就表示该车辆拥有四轮驱动的功能。

传统越野车采用四轮驱动，变速器后面装有手动分动器，前后车轴各装一个称为驱动桥的部件。变速器输出的转矩通过分动器和传动轴，分别传递到前后车轴上的驱动桥，再通过驱动桥将转矩传递到车轮上，如图 8-4 所示。有些轿车也装有四轮驱动装置，如奥迪 A4 Quattro、Q7，欧蓝德四驱版。轿车的功率都比较大，加速时重心后移，全车重量就会向后轴移动，造成前轴轻飘。前轮驱动的轿车即使在良好的路面上也会打滑，而四轮驱动就可以防止这种现象发生。

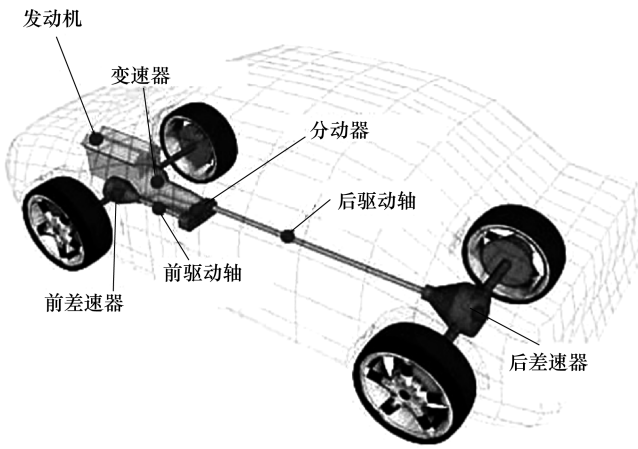


图 8-4 四轮驱动工作原理

1. 结构特点

轿车上的四轮驱动装置是常啮合式，增加了黏性耦合器，省去了手动分动器，自动将转矩按需分配在前后车轮上。在正常路面上，四轮驱动装置将发动机输出转矩的 92% 分配到前轮，8% 分配到后轮；在滑溜的路面上，将至少 40% 的发动机输出转矩分配给后轮；当前轮开始打滑时，前、后轮的转速差异会使耦合器中的黏液立即变稠并锁住耦合器，从而使传动轴只将转矩传递至后轮，待前、后轮的转速差异消失就自动回复原有驱动形式。

轿车的四轮驱动装置已经引进了电子计算机控制系统，当前轮或后轮驱动时，车辆随时根据路面状态的反馈信息分配前后车轮的动力，变为四轮驱动。四轮驱动又可以细分成四种驱动模式：全时驱动（Full-Time）、兼时驱动（Part-Time）、适时驱动（Real-Time）和兼时/适时混合驱动。

许多人也许会认为四轮驱动的汽车会有更强的贴地性能，其实他们把贴地性能的概念给混淆了，四轮驱动汽车与两轮驱动汽车的最大差别在于：FF 车型会因为车轮的空转而转向不足，偏离了弯道，而 FR 车型则会甩尾。四轮驱动则由于各个车轮的动力分配是自动的，就不会存在上面这种问题，这是涉及汽车的循迹性能的问题，而并非是贴地性能。

2. 四驱版和两驱版

同一款车型的四驱版和两驱版，往往两驱版的加速性能和贴地性能要强于四轮版，最好的例子就是奥迪 A4，因为四轮驱动的车辆在重量和摩擦力方面都比两轮驱动的要大。

被动式的四轮驱动系统，采用的是机械式的分动装置，例如，齿轮式扭力感应差速器（奥迪的 Quattro），或者油压式分动器（保时捷 911 Turbo），该系统是在车轮发生空转以后才介入的。而主动式的四轮驱动系统，是通过由计算机控制的多片式离合器来介入的，如大众的 4 Motion，计算机会不断收集轮胎的转速与节气门位置等数据，在轮胎发生空转以前就把转矩分配好。

当两轮（前轮或者后轮）驱动的汽车发生轮胎空转打滑的时候，补救措施只有一个，就是减小发动机的驱动力，而驾驶人只有通过抬加速踏板才能达到这个目的，或者电控单元控制节气门开度变小。而四轮驱动的汽车就不同了，你可以任凭自己的喜好加油，动力会通过电子系统自动分配到各个车轮上，能更加有效地防止车轮打滑的情况发生。

8.3　新能源汽车动力系统设计

新能源汽车包括氢燃料汽车（HV）、（插电式）混合动力汽车（HEV/PHEV）、纯电动汽车（EV）、增程式电动汽车（EREV）和燃料电池汽车（FCV）等。

8.3.1　氢燃料汽车动力系统

氢燃料汽车（Hydrogen Vehicle）是以燃烧氢能作为动力的汽车，它的工作原理本质上不同于燃料电池汽车。氢能相对于化石燃料或生物燃料的显著优势，在于它能实现零排放：氢的燃烧释放大量热能，而副产物只是纯净的水。不仅如此，氢能源还可以整合到现有的内燃机概念之中，即所谓的双燃料发动机是指装备一套传统的燃油喷射系统和一个氢-空气混合装置的发动机，它可以在汽油和氢能源模式之间无缝切换。这一技术能使车辆在利用氢燃料排放优势的同时，仍能使用现成的汽油销售网络。表 8-1 总结了宝马 Hydrogen 7 的 V12 双

燃料氢发动机的技术参数。

表 8-1　宝马 Hydrogen 7 V12 氢能源发动机的技术参数

发动机形式	V12
燃料类型	生物燃料：LH_2（液体氢）和汽油
排量	6.0L
最大输出功率	191kW，5100r/min
最大输出转矩	390N·m，4300r/min
H_2 雾化	外部氢气-空气混合
汽油雾化	缸内直喷

但是，尽管氢燃料发动机有许多好处，在氢燃料成为一种适用于众多机动交通工具的可替代性能源之前，依然有很多关于生产安全、成本和效率以及控制流程的技术问题必须得到解决，具体包括：

- 氢燃料的生产过程要可持续，并在经济承受范围之内。
- 氢燃料的运输过程要安全、可持续，并在经济承受范围之内。
- 氢燃料在汽车上的存储要安全可靠。

当今，燃料水蒸气重整法是一种有效、经济、广泛采用的制氢方法，它是通过水蒸气与燃料间的反应来制取氢气的。从可持续发展的角度来说，电解水（特别是高温电解）和通过藻类生物产生氢气是两种很有前途的氢气制取方式。随着科学研究和产业化的深入开发，提高氢气生产效率和降低生产成本前景可期。

将氢燃料配送给驾驶人个体的过程，需要一整套由中央或分布式生产设备、管道、储存容器、运输或分销设施（加油站）组成的全新基础设施。由于氢气所需的点火能量低（容易点着），并能通过金属扩散脆化钢材（氢脆），在运输和存储过程中，安全问题是主要的关注对象。将氢燃料应用到乘用车上的最大问题是车上储存的安全性。维持足够的续驶里程所需的氢如果以液态的形式存储，则只能存储在合适的封装容器之中。但这需要冷藏在 –250℃ 深冷环境中，才可避免液氢汽化。图 8-5 展示了这种深冷温储罐系统的结构简图，

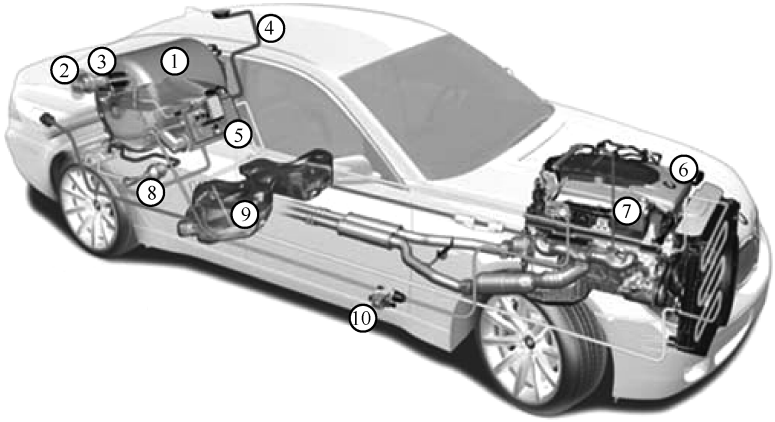


图 8-5　氢燃料汽车主要部件布置图

1—氢燃料罐　2—氢燃料罐盖子　3—氢燃料连接器　4—连接泄压阀的安全管路　5—包含液氢热交换和储氢罐控制单元的辅助单元盒　6—双燃料内燃发动机　7—氢气进气歧管　8—汽化控制系统　9—油箱　10—压力控制阀

可存储 8kg（或 170L）液态氢。如果冷却系统失效了，包含多层反射铝箔的高真空隔热层可以维持大约 17h 来延缓液氢汽化。正是由于前述氢气的高可燃性，针对存储氢燃料汽车的被动安全性要求极为苛刻。

基于宝马 7 系轿车开发的 Hydrogen 7 展示了氢燃料汽车概念的技术可行性，也说明在当今商业环境下，氢动力汽车概念的开发、制造和销售是可行的。图 8-5 展示了 Hydrogen 7 传动系统的主要部件。

在氢动力模式下，Hydrogen 7 能在 9.5s 内从 0 加速到 100km/h，最大速度则被电子限速控制在 230km/h 内。总续驶里程是 700km，包括氢动力模式下的 200km 以及汽油模式下的 500km。

8.3.2　混合动力汽车动力系统

混合动力汽车（Hybrid Electric Vehicle，HEV）指在车辆动力系统中采用两种不同动力源的一种技术，目前更侧重于油电混合动力，即能量由电池和燃油提供。动力由燃油发动机和电机提供。

混合动力汽车的燃油经济性能较高，行驶性能优越，在起步、加速时，由于有电机的辅助，可以降低油耗。辅助发动机的电机可以在起动的瞬间产生强大的动力，因此，车主可以体验更强劲的起步和加速，实现较高水平的燃油经济性。

混合动力总成又可再分为混合动力汽车（HEV）和插电式混合动力汽车（Plug-in Hybrid Electric vehicle，PHEV）。顾名思义，PHEV 的车载动力电池可以通过插座进行充电。

混合动力总成按动力传输路线分类，可分为串联式、并联式和混联式三种。根据在混合动力系统中，电机的输出功率在整个系统输出功率中占的比重，也就是常说的混合度的不同，混合动力系统还可以分为以下四类：

1）微混合动力系统：这种混合动力系统在传统内燃机的起动机（一般为 12V）上加装了带驱动起动电机（也就是常说的 Belt-alternator Starter Generator，简称 BSG 系统）。该电机为发电起动（Stop-Start）一体式电机，用来控制发动机的起动和停止，从而取消了发动机的怠速，降低了油耗和排放。从严格意义上来讲，这种微混合动力系统的汽车不属于真正的混合动力汽车，因为它的电机并没有为汽车行驶提供持续的动力。在微混合动力系统里，电机的电压通常有两种：12V 和 42V。其中 42V 主要用于柴油混合动力系统，代表性车型是 PSA 的混合动力版 C3 和丰田的混合动力版 Vitz。

2）轻混合动力系统：该混合动力系统采用了集成起动电机（也就是常说的 Integrated Starter Generator，简称 ISG 系统）。与微混合动力系统相比，轻混合动力系统除了能够实现用电机控制发动机的起动和停止，还能够实现：①在减速和制动工况下，对部分能量进行回收；②在行驶过程中，发动机等速运转，发动机产生的能量可以在车轮的驱动需求和发电机的充电需求之间进行调节。轻混合动力系统的混合度一般在 20% 以下，代表车型是通用的混合动力皮卡车。

3）中混合动力系统：与轻混合动力系统不同，中混合动力系统采用的是高压电机。另外，中混合动力系统还增加了一个功能：在汽车处于加速或者大负荷工况时，电机能够辅助驱动车轮，从而补充发动机本身动力输出的不足，从而更好地提高整车的性能。这种系统的混合程度较高，可以达到 30% 左右，技术已经成熟，应用广泛。本田旗下的混合动力 In-

sight、Accord 和 Civic 都属于这种系统。该混合动力系统同样采用了 ISG 系统。

4）完全混合动力系统：该系统采用了 272～650V 的高压电机，混合程度更高。与中混合动力系统相比，完全混合动力系统的混合度可以达到甚至超过 50%。技术的发展将使得完全混合动力系统逐渐成为混合动力技术的主要发展方向。代表性车型是丰田普锐斯和 Estima。

以上各种不同的混合方式，都能在一定程度上降低成本和排放。各大汽车厂商在过去的十几年，通过不断的研发投入，试验总结，商业应用，形成了各自的混合动力技术路线，而在市场上的表现也各具特色。

混合动力汽车在燃油经济性上的改善非常明显，特别是在城市频繁停-驶的驾驶工况下。图 8-6 展示了混合动力汽车在一段新欧洲驾驶循环（NEDC）中，自动起动/停止、能量回收和电驱动过程中对燃油经济性的贡献，参见 15.2 节。

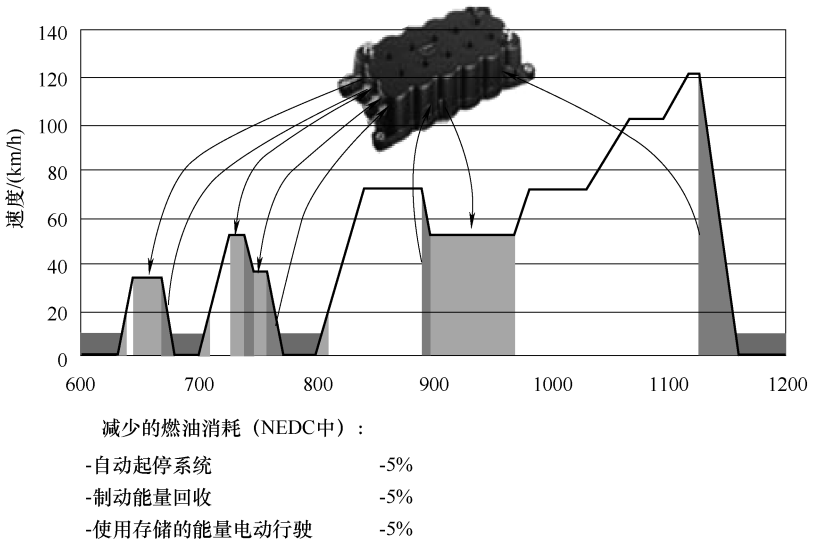


图 8-6 混合动力系统对燃油效率的贡献

混合动力系统的劣势在于附加部件带来的额外成本和重量。在某些情况下，增加的重量在一定程度上拖累了由混合动力系统带来的节油效益。然而，为了实现生产零排放汽车这一长远目标，混合动力系统只是当今的一个替代解决方案。

8.3.3 纯电动汽车动力系统

纯电动汽车（Battery Electric Vehicle，BEV），是完全由可充电电池（如铅酸电池、镍镉电池、镍氢电池或锂离子电池）提供动力源，用电机驱动车轮行驶，符合道路交通、安全法规各项要求的车辆。由于对环境影响比传统汽车较小，其前景被广泛看好。

纯电动汽车虽然已有 134 年的悠久历史，但直到 20 世纪 90 年代，人类对于燃油消耗和尾气排放的认识日渐清晰，电动汽车才再次被拉回到人们的视野中。与内燃机相比，电发动机有着明显的优势：

- 电能转换成驱动力的过程实现了 100% 的零排放。

- 更高的效率水平（约 95%）。
- 更高的能量密度。
- 转速从零开始就能输出最大转矩。
- 更低的外部噪声等级。
- 精简的传动系统概念。
- 无须冷却系统。

1. 纯电动汽车关键技术

纯电动汽车的关键技术包括电池技术、电机技术、控制器技术，这三项技术是电动汽车所特有的技术，也是一直制约当今电动汽车大规模进入市场的关键因素，如图 8-7 所示。

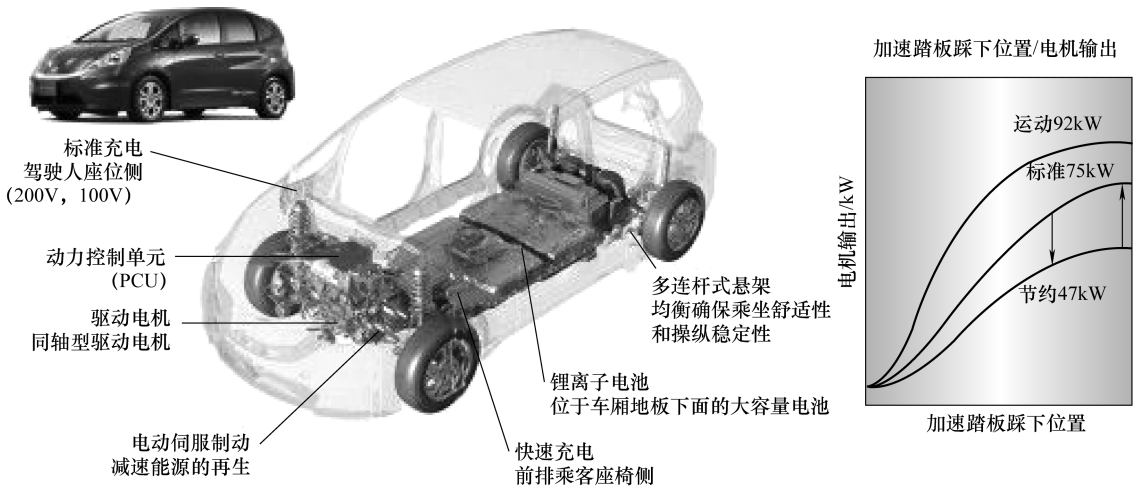


图 8-7　纯电动汽车组成简图

（1）电池技术

电池是电动汽车的动力源泉，也是一直制约电动汽车发展的关键因素。电动汽车用电池的主要性能指标是比能量（E）、能量密度（E_d）、比功率（P）、循环寿命（L）和成本（C）等。要使电动汽车能与燃油汽车相竞争，关键就是要开发出比能量高、比功率大、使用寿命长的高效电池。

电动汽车电池可以分为两大类，即蓄电池和燃料电池。蓄电池适用于纯电动汽车，可以归类为铅酸电池、镍基电池（镍-氢及镍-金属氢化物电池、镍-镉及镍-锌电池）、钠 ß 电池（钠-硫电池和钠-氯化镍电池）、二次锂电池、空气电池等类型。电动汽车电池组由多个电池串联叠置组成，一个典型的电池组大约有 96 个电池，对于可充电到 4.2V 的锂离子电池而言，这样的电池组可产生超过 400V 的总电压。

（2）电机技术

电动汽车驱动电机是所有电动汽车必不可少的关键部件。使用较多的有直流有刷、永磁无刷、交流感应和开关磁阻四种电机。这四种电机各有优缺点，但是对于电动汽车而言，由于电能是由各类电池提供的，价格昂贵而弥足珍贵，使用相对效率最高的永磁无刷电机是较为合理的，它已被广泛应用于功率小于 100kW 的现代电动汽车上。

目前已有越来越多的电动汽车采用性能先进的轮毂电机，它用电机（多为永磁无刷式）

直接驱动车轮，因此无传统汽车的变速器、传动轴、驱动桥等复杂的机械传动部件，汽车结构大大简化。但是它要求电机在低转速下有很大的转矩，特别是对于军用越野车，要求电机基点转速：最高转速 =1∶10。近几年，美、英、法、德等国纷纷将电动轮技术应用于军用越野车和轻型坦克上，并取得了重大成果。

（3）控制器技术

控制器技术的变速和方向变换是靠电机调速控制装置来完成的，其原理是通过控制电机的电压和电流来实现电机的驱动转矩与旋转方向的控制。目前电动汽车上应用较广泛的是晶闸管斩波调速，通过均匀改变电机的端电压，控制电机的电流，来实现电机的无级调速。在电子电力技术的不断发展中，它也逐渐被其他电力晶体管（如 GTO、MOSFET、BTR 及IGBT 等）斩波调速装置所取代。从技术的发展来看，伴随着新型驱动电机的应用，电动汽车的调速控制转变为直流逆变技术的应用前景看好。

在驱动电机的旋向变换控制中，直流电机依靠接触器改变电枢或磁场的电流方向，实现电机的旋向变换，这使得控制电路复杂、可靠性降低。当采用交流异步电机驱动时，电机转向的改变只需变换磁场三相电流的相序即可，可使控制电路简化。此外，采用交流电机及其变频调速控制技术，使电动汽车的制动能量回收控制更加方便，控制电路更加简单。

随着电机及驱动系统的发展，控制系统趋于智能化和数字化。变结构控制、模糊控制、神经网络、自适应控制、专家系统、遗传算法等非线性智能控制技术，都将各自或结合应用于电动汽车的电机控制系统。它们的应用将使系统结构简单，响应迅速，抗干扰能力强，参数变化具有鲁棒性，可大大提高整个系统的综合性能。

尽管电机表现出了卓越的特点，但就目前而言，电力驱动概念的缺点是电能在车上的存储。与存储在燃料箱里的液态或气态燃料相比，电池组受到当今技术水平的制约之处是：

- 成本高。
- 寿命短。
- 因能量密度低，导致尺寸、重量、续驶里程等方面的不足。
- 需长时间充电“加油”造成的不便利性。

接下来的例子说明了该难题：一个装满 60.0L 燃料的油箱代表车上储存着 1.88GJ 的能量，重量仅为 45.0kg（油箱除外）。以燃料泵平均 50L/min 的填充速度计算，油箱能在 72s 内填满。而存储同等能量的高级锂离子电池包，重达 4430kg，大约需要 2600L 的安装空间。若使用 7kW 的输入电源，充满电将需要 7～8h。

尽管如此，研究机构和相关行业正在努力改进电池概念或者寻找存储电能的可替代途径，已经投入巨资研发各种新型电池、超级电容或飞轮系统等储能装置。而最有发展前途的当属电动汽车无线充电技术。

2. 无线充电技术

电动汽车无线充电技术通过埋于地面下的供电导轨以高频交变磁场的形式将电能传输给运行在地面上一定范围内的车辆接收端电能拾取机构，进而给车载储能设备供电，可使电动汽车搭载少量电池组，延长其续驶里程，同时电能补给变得更加安全、便捷（图 8-8）。动态无线供电技术的主要参数指标有电能传输距离、功率、效率、耦合机构侧移适应能力、电磁兼容性等。因而，开发大功率、高效率、强侧移适应能力、低电磁辐射、成本适中的动态无线供电系统，成为国内外各大研究机构当前的主要研究热点。

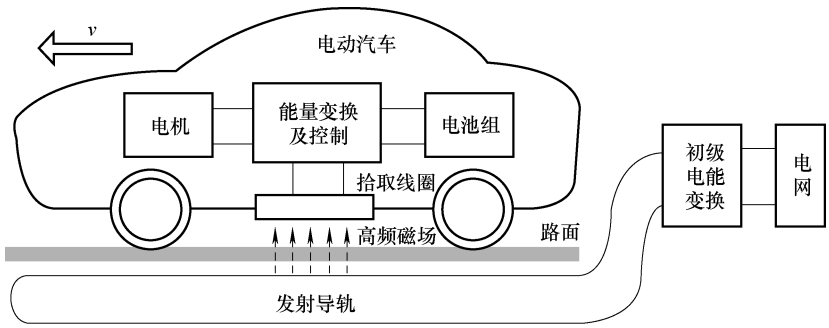


图 8-8　电动汽车无线充电技术工作原理

无线充电技术具备如下优点：使用方便、安全，无火花及触电危险，无积尘和接触损耗，无机械磨损和相应的维护问题，可适应多种恶劣环境和天气。其缺点是：设备的经济成本投入较高，维修费用大；实现远距离大功率无线电磁转换，能量损耗相对较高；无线充电设备的电磁辐射会对环境造成污染。

电动汽车无线充电技术具有方便、快捷的优点，但目前还处于研发和探索阶段，在实用化方面还有大量的工作要做。此外，根据当前能源匮乏的实际情况，电动汽车实现大功率无线充电技术的产业化运作还为时过早，但作为未来灵活的充电方式，进行前期探索很有必要。随着该技术的不断完善，同时结合中国智能电网的建设，其在电动汽车智能充换电服务网络方面的应用必将大大推动电动汽车的大规模应用。

尽管电动汽车本身实现了零排放，但是如果电网的能量来源于煤炭或其他化石能源，那么发电过程可能会显著增加二氧化碳等温室气体的排放。

当今纯电动车的典型车型是自 2008 年开始销售的特斯拉（Tesla）轿车，2016 年 4 月公布了最新款 Model 3 产品，采用特斯拉全新的设计平台，尺寸近于宝马 3 系与奥迪 A4，延续了以往产品的极致操控体验。用户可以选择单电机后驱和双电机四驱两个版本，均配备标志性的行李箱，5 座布局，0～60mile（约 96.6km）的加速成绩为 6s，续驶里程达到了 470～557km，且支持使用超级充电桩，每充电 1h 可行驶约 480km。据了解，Model 3 具备无线连接功能，可以使用特斯拉独创的 OTA 空中升级系统时时更新以获取并体验如自动驾驶等“极智”功能。

8.3.4　燃料电池汽车动力系统

燃料电池汽车（Fuel Cell Vehicles，FCV）是一种用车载燃料电池装置产生的电力作为动力的汽车。车载燃料电池装置所使用的燃料为高纯度氢气或含氢燃料经重整所得到的高含氢重整气（图 8-9）。与通常的电动汽车比较，其动力方面的不同在于 FCV 用的电力来自车载燃料电池装置，电动汽车所用的电力来自于电网充电的蓄电池。因此，FCV 的关键是燃料电池。

1. 工作原理

燃料电池汽车的工作原理是，作为燃料的氢在汽车搭载的燃料电池中，与大气中的氧气发生氧化还原化学反应，产生出电能带动电机工作，由电机带动汽车中的机械传动结构，进而带动汽车的前桥（或后桥）等行走机械结构工作，从而驱动电动汽车前进。

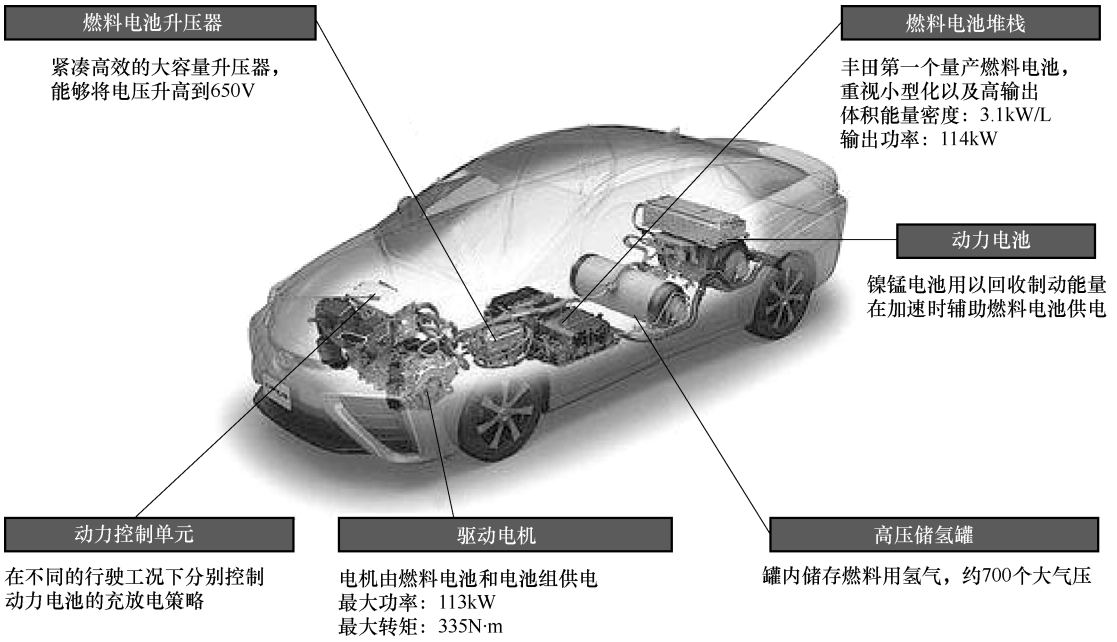


图 8-9　燃料电池汽车组成原理

燃料电池汽车的氢燃料能通过几种途径得到。有些车辆直接携带着纯氢燃料，另外一些车辆装有燃料重整器，能将烃类燃料转化为富氢气体。单个的燃料电池必须结合成燃料电池组，以便获得必需的动力，满足车辆使用的要求。

燃料电池汽车与传统的内燃机驱动汽车在构造及动力传输等方面的不同，为汽车的整体设计提出了新的要求。传统内燃机汽车的发动机-变速器动力总成在燃料电池汽车中不复存在，取而代之的是燃料电池反应堆、蓄电池、氢气罐、电机、DC/DC 转化器等设备。而制动系统和悬架也相应变化。因此，根据燃料电池汽车自身特点，在设计时，应进行相应的变化和改进。

燃料电池汽车的特点表现在以下方面。

2. 底盘布置

燃料电池动力总成包括氢气罐总成、蓄电池总成、燃料电池堆总成、动力输出系统总成等。其中，储氢罐一般放置于底盘的中部，或后排座椅的下方空间（传统内燃机轿车的油箱位置），将氢气罐分散存储。除了燃料电池动力总成，对汽车制动总成、前后悬架总成及轮胎等方面也应做相应的调整和测试。特别是随着轮毂电机技术的发展，使燃料电池汽车在电机的放置有了新的选择，增大了汽车内部空间。而各电动轮的驱动力也可直接控制，提高了恶劣路面条件下汽车的行驶性能。底盘布置应把绝大多数的负载均匀分配在底盘的前后端，降低车辆的总体重心，使轿车具有良好的操控性能，并改善车辆的整体安全性。

3. 电池管理系统

燃料电池汽车的动力系统一般由质子交换膜燃料电池、蓄电池、电机和系统控制设备组成。燃料电池所生成的电能经过 DC/DC 转换器、DC/AC 逆变器等的变换，带动电机运转，将电能转变为机械能，为汽车提供动力。在一些关键部件，如质子交换膜燃料电池和蓄电池等，其热特性及传热性质与传统汽车有着很大的不同，为燃料电池汽车的水、热管理提出了

新的目标和要求。

4. 电子控制系统

与传统汽车相同，电子控制在燃料电池汽车的发展中也起着越来越重要的作用。汽车的各种操纵系统都会向着电子化和电动化的方向发展，实现“线操控”，即用导线代替机械传动机构，如“导线制动”“导线转向”等；现有的 12V 动力电源已满足不了汽车上所有电气系统的需要，42V 汽车电气系统新标准的实施，将会使汽车电器零部件的设计和结构发生重大的变革，机械式继电器、熔丝式保护电路也将随之淘汰。同时，燃料电池的特性有其自身的特点：

1）电压低，电流大；

2）输出电流会随温度的升高而升高，输出电压会随输出电流的增大而下降；

3）从开始输出电压、电流到逐渐进入稳定状态，停留在过渡带范围内的动态反应时间较长。

正是由于以上特点，大多数电器和电机难以适应其电压特性，所以必须和 DC/DC 转换器和 DC/AC 逆变器配合使用，需要对燃料电池系统进行大量的功率调节以保证电压的稳定。

1）当燃料电池的输出功率大于汽车的需要时，多余的功率可对蓄电池进行充电，在动力系统起动时蓄电池可以给辅助系统提供电源。

2）当燃料电池的功率不能满足汽车加速、爬坡时，蓄电池可提供附加功率，配合燃料电池共同使用。

所以，车辆可采用 42V 的辅助电源独立地为各种电子、电气设备提供电能。因为燃料电池汽车较之传统内燃机汽车在驱动方式上有着本质的区别，所以在底盘布置、水热管理、电子控制等诸多方面的设计也有着很大的不同。

8.4　汽车动力性能试验与验证

早在虚拟样车阶段，就要开始发动机性能特性的模拟与评估，例如，燃烧过程或进排气系统的热力学行为。最初进行软件在环仿真（SIL）和硬件在环仿真（HIL）测试（比较 6.5 节），整个汽车动力系统原型部件制作完成后，需进行台架试验（图 8-10）。在硬件在环仿真（HIL）测试中，物理形态上不存在的硬件（如轮胎、车辆、道路或驾驶人）同样需要进行实时模拟和测试。

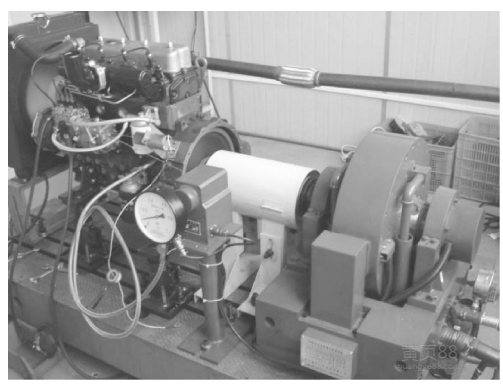


图 8-10　动力总成试验台

整车验证从首辆（组）原型车开始，最先在辊式底盘测功机上开始测试，然后在封闭的标准跑道上试车，最终原型车进行实时路试。

在普通发动机试验台上，通过制动系统施加一个额定的反转力矩，来观察发动机在若干特殊操作点的静态特性。而在动态发动机试验台上，可通过电动加载使发动机转矩或转速快速变化，来模拟真实的驾驶循环。最新开发的高动态发动机试验平台，可非常逼真地模拟整车实时动态特性（如曲轴旋转带来的振动），使以前只有原型测试才能得到的结果，现在只需通过发动机硬件测试即可获得。高动态试验平台大大降低了整体的测试工作，提高了早期产品的成熟度。通过实际道路测试获得的发动机数据与高动态试验平台获得的数据进行对

比，可验证模拟结果的准确性（图 8-11 和图 8-12）。

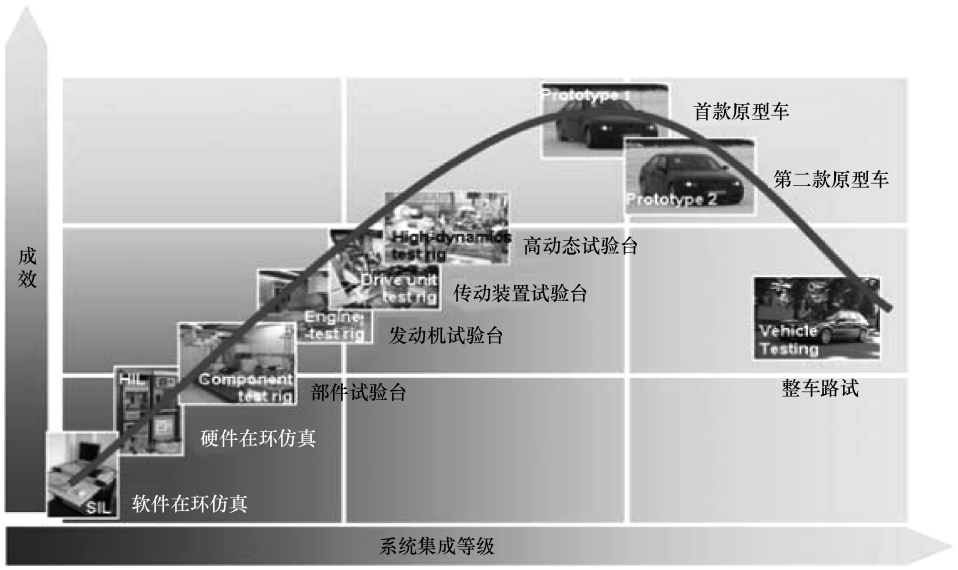
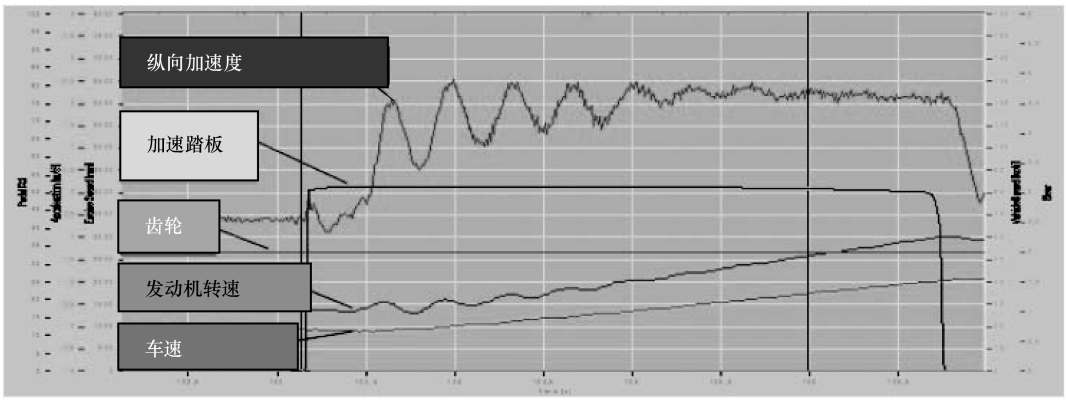
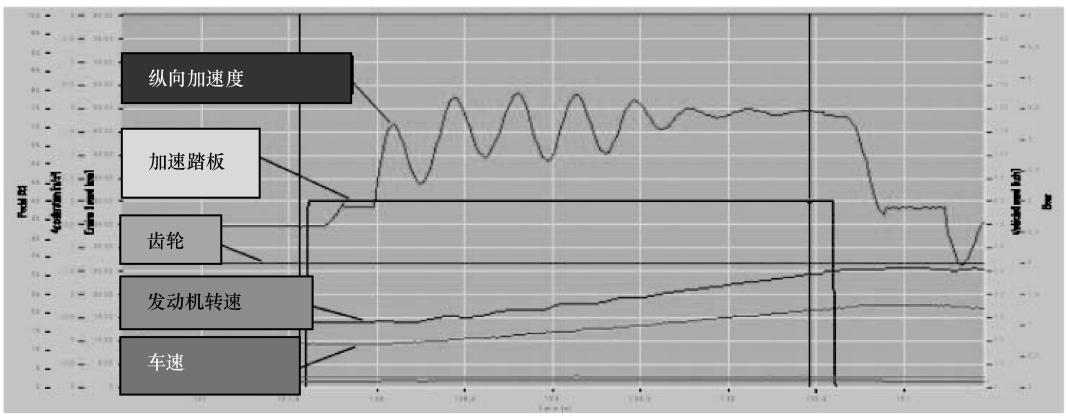


图 8-11　动力系统验证阶段（来源：宝马）



a) 道路测试（宝马318i）



b) 高动态试验平台

图 8-12　高动态试验平台与实际路试结果的比较

第9章

汽车操控性设计

操控性和舒适性是两个相互矛盾的车辆动态特性。车辆的概念决定了它是一辆注重舒适性的轿车还是注重动态特性的运动车型。例如，与轿车和厢式车相比，跑车对运动性和舒适性要求有不同的分配。即使按照同一个开发理念设计的新车系列，衍生车型的动力学特性也有区分。例如，客户对一辆宝马 M3 型与宝马 320i 型的车辆动态特性有着完全不同的期望，虽然这两辆车均是同一个车型系列的衍生产品。

9.1 概述

操控性是车辆通过转向盘、加速踏板和制动踏板把驾驶人命令转换成预定运动的能力。它描述了驾驶人在不同的驾驶环境下加速、减速和操纵汽车的方式、速度和程度，以及驾驶人和乘客如何感知产生的运动。虽然操控性通常被解释为只有运动款车辆驾驶人所需的一种车辆特性，但更意味着车辆高速通过崎岖山路的能力。操控性也指车辆在紧急情况下如何安全地驾驶的能力，因此它是主动安全的基本元素。

从客户的角度来看，一辆汽车的动力学性能表现在三个方面——施加在车辆、乘客和行李上不同方向的作用力。

- 纵向动力学：加速和减速性能，指汽车对加速和减速的响应。
- 侧向动力学：垂直于行驶方向作用力的汽车响应，通常由车辆转向引起。
- 垂向动力学：汽车对垂直力的响应，由轮胎在不平路面上滚动与发动机的相对运动引起。

9.1.1 纵向动力学

汽车的纵向动力学是被驾驶人在平直路面上驾驶而感知的，包括在加速、减速和负载变化，以及恒速或上下坡驾驶时。在这里，典型的顾客需求包括：

- 动力性能（发动机功率和转矩值）。
- 牵引力（加速和减速时）。
- 操控稳定性。
- 制动距离（在各种路面）。
- 车身运动（负载变更时）。

车辆性能与客户相关的重要特性是加速度（从 0 到 100km/h 所需的时间）、额定功率（kW）、最高车速（km/h）和最大限度的加速性能（在 4s 内达到的距离）。其他一些不能直接测量出来的条件就是独立性（sovereignty），这意味着毫不费力的加速度，如必须超过另一辆车的时候，运动特性，如通过一个很短的响应时间，在这段时间内发动机的高速运转

能力。

在这种背景下，发动机和变速器作为主要组件，有着客户关注的双重特性：首先，整车性能主要取决于发动机（如转矩、发动机转速和响应）和变速器（如传动比和效率）的特性，这使得它们成为车辆操控性的决定性因素；其次，发动机和变速器的类型是客户关注的除整车特性之外最重要的车辆特征。与直列 6 缸汽油发动机或柴油机相比，许多客户在情感上更喜欢 V8 发动机，即使前者可能有一个类似的甚至更好的车辆性能。以发动机为例，部分顾客要求只配备克莱斯勒 HEMI 发动机。HEMI 发动机或多或少地作为一个单独的产品来营销，它有自己的网站，甚至是品牌的配件。其实克莱斯勒集团的三个不同品牌（道奇、克莱斯勒、吉普）均配备 HEMI 发动机，每辆车在车身或者车尾配有 HEMI 的标志。“HEMI inside”可能是客户的一个直接需求。

选择变速器，与其说是选择最佳性能，还不如说更多是个人喜好。小型车与经济型轿车通常将手动变速器作为一项基本功能配置，因为相比于自动变速器，它们更便宜、更高效。自动变速器或许作为一种选配，但其相对较低的传动效率明显减弱了发动机的性能。手动变速器允许驾驶人直接控制从发动机传送到车轮的动力，而自动变速器使得驾驶人从离合器和换档活动中解放出来。因此，双座轻型轿车、越野车辆和货车通常配有手动变速器，而舒适型轿车、运动型轿车和 SUV 往往配备自动变速器。不同的市场也表现出不同的偏好：例如，绝大多数美国消费者更喜欢自动变速器（近 90%），欧洲客户更多地选择手动变速器（占整个市场 80%，高档轿车 60%）。

通过驱动轮和路面接触产生的最大摩擦力限制了车辆传递最大加速度和最小减速度的牵引力。它主要取决于驱动轮的轮胎与路面之间接触的摩擦系数（COF）。为了优化牵引力，车辆可能配备四轮驱动。四轮驱动可改善牵引力，特别是在湿滑的路面上。因此通常被越野车辆选装，同时也可改善车辆的加速性能、操控性和高速动态稳定性。

客户对制动系统的需求包括制动性能（最低制动距离）和独立性（毫不费力的减速、减速时的车辆稳定性以及减速时的最小车身晃动）。

稳定性是指汽车即使遇到不平路面与侧风等外界干扰时，仍然保持直线行驶的能力，尤其是当车辆加速或减速时。驾驶人感受到汽车缺乏稳定性，如需急停时就要过多的转向纠正。

9.1.2 侧向动力学

侧向动力学行为通常是车辆动力学中“有趣的因素”，并且客观来讲是最难描述的部分：转向是由驾驶人来主观感受的，如手感直接、操控敏捷、稳定性和安全性强等。旅行车驾驶人渴望在弯曲的道路上实现对车辆高速侧向加速运动的精确控制。“它驾驶起来就像在钢轨上一样!”——是一个客户对侧向动力学正面经历的典型描述。从驾驶人的角度来看，驾驶人从直线前进改变到以无限的最大侧向加速度转弯时，必须是自发的、可预测的、容易控制的和稳定的，无不良的纵向影响（如加速、减速、路面载荷变化等）、道路条件或气候条件。

车辆侧向动态特性的测量要求是车辆的最大横向加速度。实际上很少有客户按照横向加速度驱动运动型车辆，在以前仅作为概念设计的基础。图 9-1 比较了一个典型顾客在常规道路开车 3 万 km 与一个专业驾驶人驾驶同样汽车在路试跑道开车 1 万 km 时的横向路谱图。

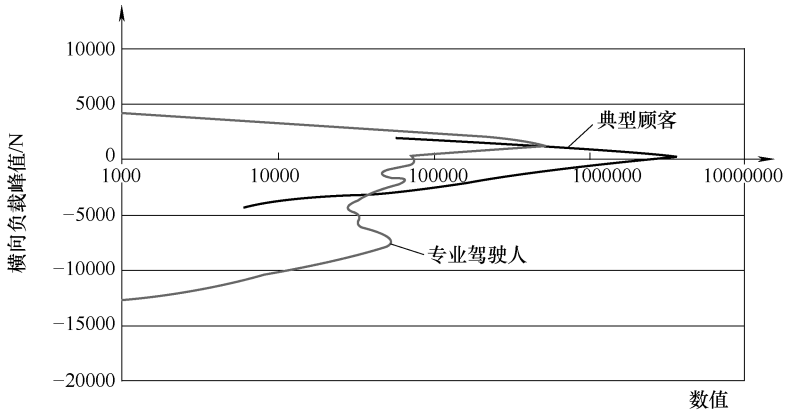


图 9-1　正常和动态驾驶时的路谱比较

9.1.3　垂向动力学

就操控性而言，垂向动力学是车辆的一个使用特性：通过确保在每一种驾驶情况下最佳的轮胎-路面接触，垂向动力学限定了纵向和侧向动力学的物理极限。客户对垂向动力学的需求主要是乘坐舒适性，相关内容详见 10.2 节。

9.2　汽车转向系统设计

操控性的设计意味着优化相互冲突的目标，如稳定性、加速/减速性、牵引性能和舒适性。两个子系统确定汽车的操控性：动力系统和底盘。

9.2.1　转向系统设计要求

汽车转向系统（steering system）用来改变或保持汽车行驶或倒退方向。其功能就是按照驾驶人的意愿控制汽车的行驶方向。汽车转向系统对汽车的行驶安全至关重要，因此汽车转向系统的零件都称为安全件。汽车转向系统和制动系统都是汽车安全必须要重视的两个系统。

汽车转向系统的设计要求如下：

1）汽车转弯行驶时，全部车轮应绕瞬时转向中心旋转。

2）转向轮具有自动回正能力。

3）在行驶状态下，转向轮不得产生自振，转向盘没有摆动。

4）转向传动机构和悬架导向装置的运动不协调，应使车轮产生的摆动最小。

5）转向灵敏，最小转弯直径小。

6）操纵轻便。

7）转向轮传给转向盘的反冲力要尽可能小。

8）转向器和转向传动机构中应有间隙调整机构。

9）转向系统应有能使驾驶人免遭或减轻伤害的防伤装置。

10）转向盘转动方向与汽车行驶方向的改变相一致。

为了使汽车具有良好的机动性能，必须使转向轮有尽可能大的转角，其最小转弯半径能

达到汽车轴距的 2 ~ 2.5 倍。

转向操纵的轻便性通常用转向时驾驶人作用在转向盘上的切向力和转向盘转动圈数两项指标来评价。轿车转向盘从中间位置转到一端的圈数不得超过 2.0 圈，货车则要求不超过 3.0 圈。

9.2.2 液压助力转向机构设计

当今绝大多数乘用车采用齿轮齿条助力转向系统，当转动转向盘时，与转向柱连接的小齿轮带动齿条从一边转到另一边。这个齿条与转向横拉杆连接，横拉杆运动使转向轮转动。转向传感器是一个扭力杆，它测量施加到转向盘的转矩，同时使液压阀（液压助力转向）或电子控制单元（电动助力转向）触发连接转向齿条（或转向柱）的液压（或电动）执行机构（图 9-2）。

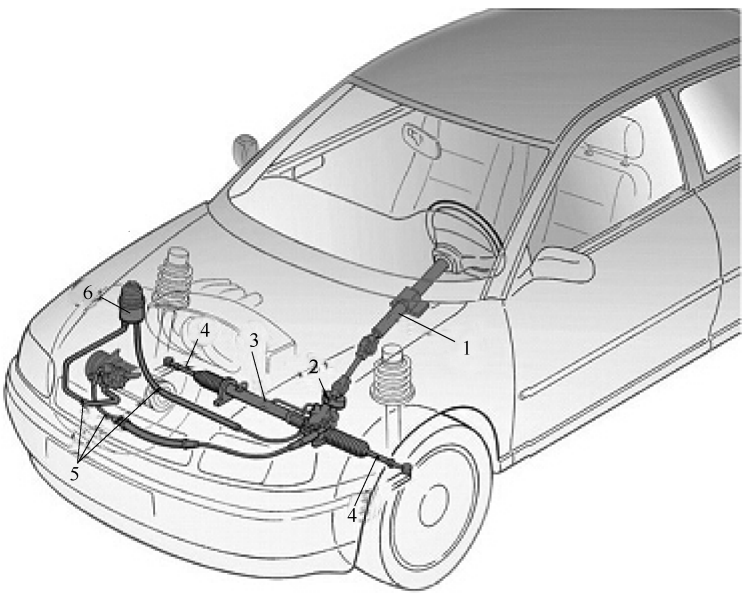


图 9-2 液压助力转向系统（来源：ZF Lenksystenme）

1—转向柱 2—转向传感器 3—转向齿轮 4—转向横拉杆 5—压力、吸油和回油管路 6—储油罐

传统的齿条和齿轮转向系统有固定的传动比，必须在灵敏转向（如使汽车在弯曲道路上中速行驶时的舒适性）和不太灵敏转向（如使汽车在高速行驶时的稳定性）之间进行折中。最新的宝马车型有一种兼顾两者需求的新概念转向系统，其中一个行星齿轮机构集成到转向柱中，可无级调节齿轮传动比，从而在低速行驶时可增大转向角，而高速行驶时减少转向角，使得转向盘与车轮永久保持机械连接。

9.2.3 线控转向机构设计

对未来的发展趋势进行预测，采用线控技术能够进一步提高汽车转向柔性，其转向力仅由电子执行机构产生——在转向盘和车轮之间没有任何机械连接。一个反馈制动器模拟现实情况下驾驶人制动时的感觉。除了保留转向机构传动比等转向特性，以便适应各种驾驶环境或自助泊车辅助系统，转向机构将不再采用转向柱，具有广阔的应用前景：

- 独立于左驾/右驾（LHD/RHD）的发动机舱。
- 改进的碰撞性能。
- 简化装配过程。

类似于线控制动，安全是目前应用线控系统最大的考量。缺少转向盘与车轮之间的机械连接对系统提出了更高的可靠性要求，这是需要通过全面的系统冗余来保证的（图 9-3）。

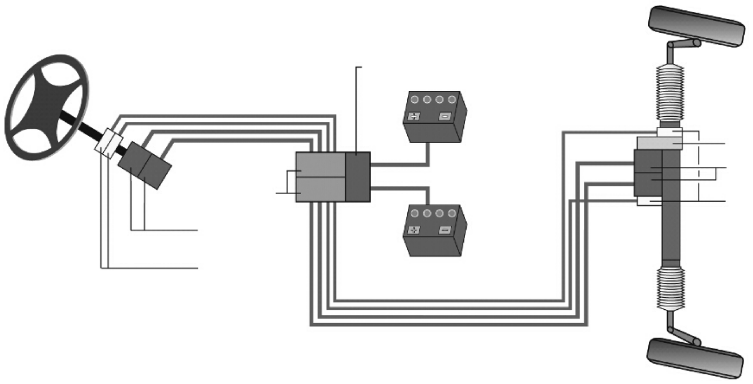


图 9-3　电动助力转向系统（来源：ZF Lenksysteme）

采用线控技术能够进一步提高汽车转向柔性。汽车线控转向系统由转向盘总成、转向执行总成和主控制器（ECU）三个主要部分以及自动防故障系统、电源等辅助系统组成。

汽车转向盘总成包括转向盘、转向盘转角传感器、力矩传感器、转向盘回正力矩电动机。转向盘总成的主要功能是将驾驶人的转向意图（通过测量转向盘转角）转换成数字信号，并传递给主控制器；同时接受主控制器送来的力矩信号，产生转向盘回正力矩，以提供给驾驶人相应的路感信息。

主控制器对采集的信号进行分析处理，判别汽车的运动状态，并向转向盘回正力矩电动机和转向电动机发送指令，控制两个电动机的工作，保证在各种工况下都具有理想的车辆响应，以减少驾驶人对汽车转向特性随车速变化的补偿任务，减轻驾驶人负担。同时控制器还可以对驾驶人的操作指令进行识别，判定在当前状态下驾驶人的转向操作是否合理。当汽车处于非稳定状态或驾驶人发出错误指令时，线控转向系统会将驾驶人错误的转向操作屏蔽，而自动进行稳定控制，使汽车尽快地恢复到稳定状态。

自动防故障系统是线控转向系统的重要模块，它包括一系列的监控和实施算法，针对不同的故障形式和故障等级做出相应的处理，以求最大限度地保持汽车的正常行驶。

9.3　汽车底盘系统设计

底盘系统设计与选型包括操纵系统、悬架系统、轮胎和车轮、制动装置、底盘电子控制系统的设计与选型等，整车概念的基本参数，如轮距、轴距、重心、重量、轴载分配、簧上/簧下质量、风阻系数、底盘部件和子系统（轴、弹簧减振器系统、车轮和轮胎、制动系统、转向系统以及车身）共同决定了整车动力学性能（操纵平稳性和驾驶平顺性）。在概念阶段有待解决的主要概念冲突是：

- 在给定发动机几何尺寸和车身宽度的条件下，使轮宽最大化；
- 在给定的车身高度下，使弹簧压缩比最大化；
- 通过运用新型和更复杂的发动机概念（如混合动力、纯电动等）和轮胎概念（如防爆胎），使振动和声学舒适性达到最佳；
- 不考虑车身重量和配置限制下，优化制动性能；
- 在考虑性价比下，改善横向动力性能。

9.3.1 悬架系统设计

悬架系统是汽车车架与车桥或车轮之间的一切传力连接装置的总称，其功能是传递作用在车轮和车架之间的力和力矩，并且缓冲由不平路面传给车架或车身的冲击力，并衰减由此引起的振动，以保证汽车平顺行驶。悬架系统应有的功能是支持车身，改善乘坐的感觉，不同的悬架设置会使驾驶人有不同的驾驶感受。外表看似简单的悬架系统综合多种作用力，决定着汽车的稳定性、舒适性和安全性，是现代汽车十分关键的部件之一。

悬架系统中还包含了减振器、弹簧、防倾杆、连杆等机构组件。其中减振器是用来缓冲振动，并且吸收能量的装置。减振器内部借由液体或气体产生的压力来推动阀体，以吸收振动的能量，并且减缓振动的作用。防倾杆亦称为“防倾扭力杆”“平衡杆”“扭力平衡杆”等。连杆是用来连接车轮与车身的杆。

悬架系统可分为非独立悬架系统，其中左右车轮运动是机械耦合的；以及独立悬架系统，其左右车轮的运动是相互独立的。由于非独立悬架系统更加便宜和可靠，它们经常被用于常规车型和重型车系列。当要求更高的乘坐舒适性和操控性时，往往选择独立悬架系统。悬架系统还可分为麦弗逊式悬架系统、横臂式悬架系统、双叉臂独立悬架系统、多连杆式悬架系统、纵臂式悬架系统、烛式悬架系统和空气悬架系统等类型。图 9-4 显示了宝马 7 系全

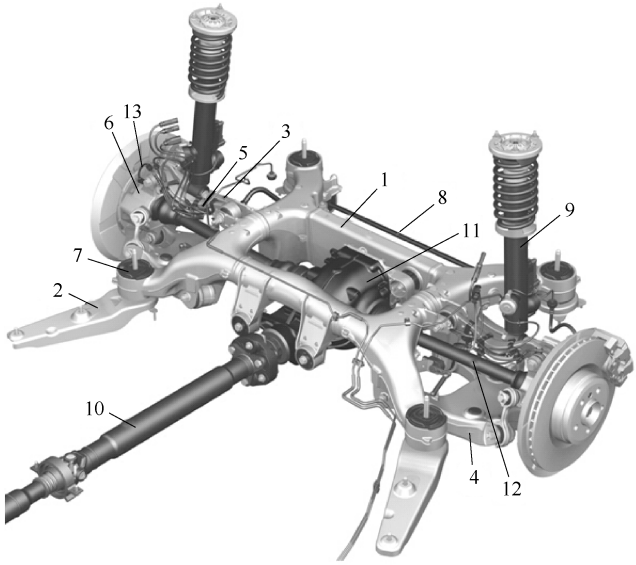


图 9-4 全铝整体式后车桥（来源：宝马）

1—后轴托架 2—推力杆 3—转向横拉杆 4—A 型摆臂 5—横向控制臂 6—车轮托架 7—橡胶支座 8—平衡杆 9—弹簧减振器 10—驱动轴 11—差速器 12—传动轴 13—轮毂轴承

铝四连杆（4-link）整体式后悬架。

9.3.2　车轮总成设计

轮胎是在各种车辆或机械上装配的接地滚动的圆环形弹性橡胶制品。通常安装在金属轮辋上，能支承车身，缓冲外界冲击，实现与路面的接触并保证车辆的行驶性能。轮胎常在复杂和苛刻的条件下使用，它在行驶时承受着各种变形、负荷、力以及高低温作用，因此必须具有较高的承载性能、牵引性能、缓冲性能。同时，还要求具备高耐磨性和耐屈挠性，以及低的滚动阻力与生热性。世界耗用橡胶量的一半用于轮胎生产，可见轮胎耗用橡胶的能力。

车轮是固定轮胎内缘、支持轮胎并与轮胎共同承受负荷的刚性轮。也将组合在一起的轮胎、轮辋与轮辐统称车轮。由车轮和轮胎两大部件组成车轮总成。

轮胎和道路之间的摩擦系数（COF）往往是限制加速和减速的因素，若不计道路状况的影响，其主要影响因素有：

- 轮胎结构和材料的黏弹性（与轮胎温度和胎压相关）；
- 轮胎的宏观几何参数（如外径、内径和宽度），以及施加于轮胎的横向、垂向和纵向作用力；
- 轮胎的微观花纹（与磨损状况相关）。

轮胎的技术规格（几何形状和材料）都显示在外侧。图 9-5 显示了典型轮胎的技术规格参数。

图 9-5　轮胎技术参数

轮胎的高宽比影响汽车操控性能和转向性能。对于运动款轿车，优先选用轮胎宽而直径大的轮辋，因为它们在平坦路面摩擦系数高而滚动阻力低。然而非道路车辆（Off-road Vehicles）通常配备高且狭的深花纹轮胎，使之在崎岖的地形上也有良好的摩擦性能。

车轮的最大尺寸受限于车身轮罩的直径和宽度。作为整车概念的主要参数，轮胎包络面

廓形决定了汽车在各种驾驶条件下的最大几何偏移。由于轮辋尺寸限制了制动盘的最大直径，它也是制动系统的概念边界条件。

车辆的最大簧下质量是车轮。因此，可以采用轻量化的车轮（价格相对较高）来改善汽车的动态性能。

9.3.3 制动装置设计

制动装置是汽车装设的全部制动和减速系统的总称，其功能是使行驶中的汽车减速、停止行驶或使已停驶的汽车保持不动，由于制动装置的结构和性能直接关系到车辆、人员的安全，被认为是汽车的重要安全件，受到普遍的重视。

在汽车制动系统的三种功能中，控制和减速是车辆动力学属性之一。连同转向系统和车轮总成系统，制动系统是保障车辆主动安全性和可靠性的最重要部件。

任何制动系统的最大效能受限于轮胎与路面接触面之间的最大摩擦力。影响制动系统效能的其他约束因素包括：

- 制动力梯度；
- 最大制动力；
- 踏板操作和轮胎减速之间的延迟差；
- 车轮制动力分配；
- 滑摩控制。

如今，乘用车的制动系统通常包括以下几个部分（图 9-6）：

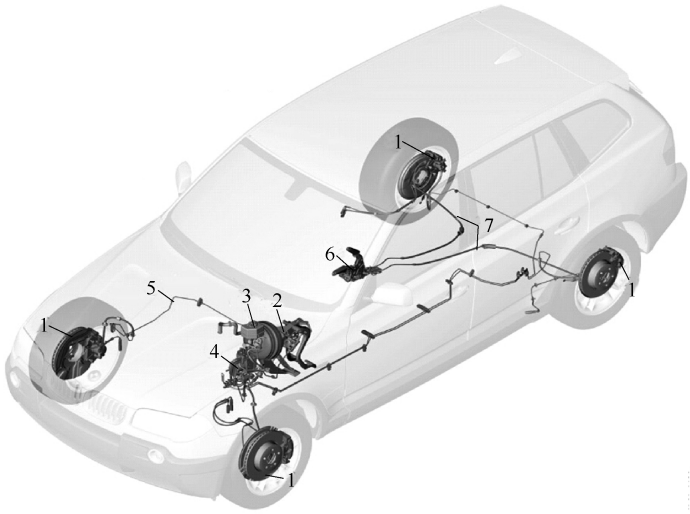


图 9-6 行车制动和驻车制动系统

1—车轮制动器、轮速传感器、制动片磨损传感器 2—制动踏板组块（制动踏板、制动伺服单元、串联制动主缸）
3—制动液储罐 4—ABS/DSC 控制单元和液压调节器 5—制动软管/管路 6—驻车制动手柄 7—驻车制动钢丝软轴

- 制动踏板（激活双主缸）；
- 制动助力器（放大操纵双主缸的作用力）；
- 双主缸（产生制动缸出口端液压压力）；

- 制动软管和管道（传送压力到车轮制动器）；
- 制动液（传递油压）；
- 制动器（盘式或鼓式制动器）；
- 制动压力阀（控制前轮和后轮上的压力分配）；
- 电子控制系统，以支持在各种驾驶条件下的最佳制动效果。

制动缸助力放大倍数越高，所需制动助力器的轮廓直径也越大——这受制于发动机舱的布置，因为在此空间中还需布置驾驶操纵系统。尤其是冷却前制动盘的空气导管，对于前端封装和设计是至关重要的，因为制动软管的弹性是决定系统响应时间的决定性因素。而制动盘的大小受限于车轮大小。由于车轮制动所有零件（盘式和卡钳、制动鼓和制动蹄）均属于簧下质量，从而会影响车辆的垂向动力学性能。

9.3.4　四轮驱动装置设计

所谓四轮驱动，又称全轮驱动，是指汽车前后轮都有动力，可按行驶路面状态不同而将发动机输出转矩按不同比例分布在前后所有的车轮上，以提高汽车的行驶能力。

四轮驱动汽车与两轮驱动汽车的最大差别在于：FF 车型会因为车轮的空转而转向不足，偏离了弯道，而 FR 车型则会甩尾。四轮驱动则由于各个车轮的动力分配是自动的，就不会存在上面这种问题。图 9-7 展示了四轮驱动汽车的构造简图。

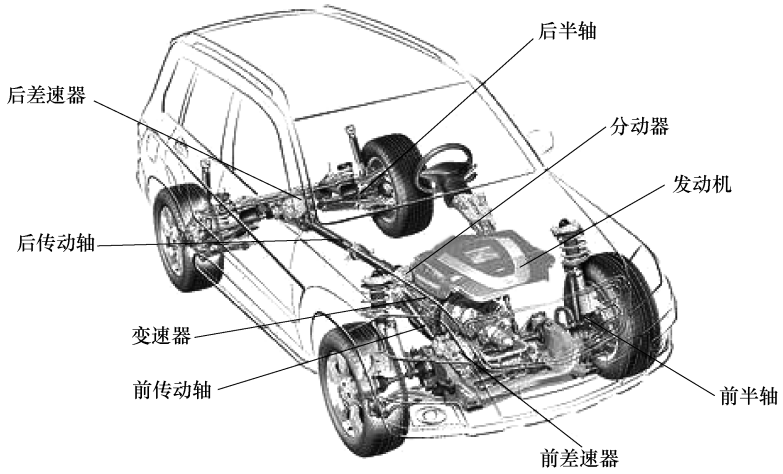


图 9-7　四轮驱动汽车结构简图

轿车的四轮驱动装置已经引进了电子计算机控制系统，当前轮或后轮驱动时，车辆随时根据路面状态的反馈信息分配前后车轮的动力，变为四轮驱动。四轮驱动又可以细分成四种驱动模式：全时驱动（Full-Time）、兼时驱动（Part-Time）、适时驱动（Real-Time）和兼时/适时混合驱动。与普通的两轮驱动车相比，四轮驱动系统需要一个额外的分动器（变速器）分配前后轴、驱动轴、差速器和传动轴之间的发动机动力。

全时四轮驱动优点：全时四驱是公路极限过弯最佳的传动方式，它可以实现车辆高速过弯时每个车轮分配到最佳的驱动力。因此这种技术常被追求操控性能的大排量轿车采用，主要目的就是提高有效驱动力和过弯极限。

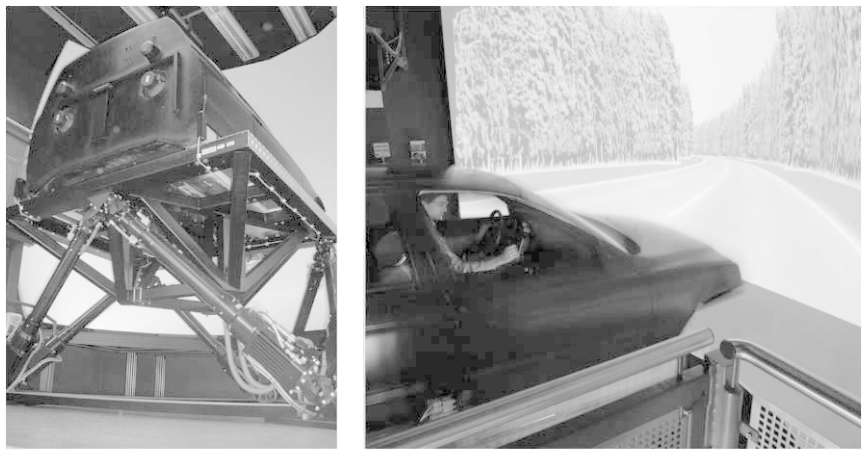
全时四轮驱动缺点：全时四驱的结构相对复杂，成本较高，占用的空间也比较大，因此不太适合在定位较低，或者体型较小的车型上装配。同时全时四驱是很消耗功率的，它的传动效率比两驱方式要低，对于看重经济性以及发动机动力较小的车型来说，不太适合装备全时四驱。

9.4 操控性试验与验证

在一个汽车开发项目的开始，底盘概念是由预开发模块（builiding blocks）组成的，并通过模拟仿真进行评估。完整的车辆建模为一个多体系统（MBS），通过弹性元件增强（具有特定的弹簧刚性系数和阻尼特性）来评估悬架和操纵系统的弹性运动学特征。

如今，整车动力学概念模拟主要是用来评估在标准化开环驾驶时的操纵性，如恒速圆形驾驶、逐步转向或正弦输入转向，驾驶人个人习惯对车辆动力学性能的影响在很大程度上被忽略了。

虽然离线仿真可以复制汽车部件的力学性能，但车辆动力学的整体感知是高度主观的，需要一个经验丰富的路试员作为“传感器”。驾驶模拟器可以体验和评估虚拟环境中动力与悬架系统的敏捷性：一个配备了真实驾驶环境（座位、踏板、转向盘等）的车身，被安装在液压六自由度平台上，从而可以往各个方向加速行驶（图 9-8b）。为了体验动力学性能，作为虚拟的视觉反馈是必不可少的，车辆的环境投影在模拟器舱面前的屏幕上（图 9-8a）。



a) b)

图 9-8 驾驶模拟器（来源：宝马）

在某种程度上，驾驶模拟器的高速控制系统允许路试驾驶人实时模拟驾驶动作，并同时体验车辆的操纵性和舒适性。超过六自由度液压平台运动学和动力学性能的极端驾驶动作将无法实时模拟。然而可以从给定的数据输入进行预计算，然后由驾驶模拟器重复演示。驾驶模拟器有一个很大的优势，甚至可与实车测试相比，可以快速地切换不同的驾驶概念并直接进行比较——无须停止和开关测试车辆。

当在真正的道路上评估实车的操控性时，有两个不同但很重要的目标：驾驶人对车辆特征的主观评价、客观动态数据的测量与分析。图 9-9 显示了一台配备相应测量设备的测试轿车。

图 9-9　配备动力学测量设备的测试车辆（来源：宝马）

第10章

车舱舒适性设计

随着生活水平的提高，人们对汽车性能的要求除了动力性、经济性、安全性之外，对车辆的舒适性、可靠性、耐久性等方面的要求也越来越高。良好的驾驶操作性能、舒适的驾乘环境、低振动和低噪声渐渐成为现代汽车的重要标志。同时，从提高工作效率和降低事故发生率的要求出发，汽车的乘坐及工作环境必须具有一定的舒适性。

车舱舒适性表征车舱内驾驶人和乘客通过所有感官所感知的舒适感觉。这是一种高度个人、主观的体验，包括垂向动力学、温度舒适性、声音舒适性和价值认知度。由于车舱舒适性是一个能提高或抑制驾驶人警觉性的因素，车舱舒适性是决定一辆新车主动安全性级别的要素之一。

10.1 概述

10.1.1 车舱舒适性的客户需求

汽车舒适性是指为乘员提供舒适、愉快的乘坐环境，货物的安全运输和方便安全的操作条件的性能。汽车舒适性包括汽车平顺性、声学性能、热舒适性、新车价值感知等；它是现代高速、高效率汽车的一个主要性能。汽车平顺性就是保持汽车在行驶过程中乘员所处的振动环境具有一定舒适度的性能。

汽车行驶时，由于路面不平等因素激起汽车的振动。振动影响人的舒适、工作效率和身体健康，并影响所运货物的完好；振动还在汽车上产生动载荷，加速零件磨损，导致疲劳失效。因此，减少汽车振动是汽车平顺性研究的主要工作。

汽车热舒适性是指对车内空气的温度、湿度和粉尘浓度实现控制调节，使车室内空气经常保持使乘员舒适的状态。汽车空调是改善工作条件、提高工作效率的重要手段。

新车价值感知是指乘坐空间大小、座椅及操纵件的布置、车内装饰、仪表信号设备的易辨认性等。与汽车其他性能不同，乘客的车舱舒适性各方面的评价都与人体主观感觉直接相关。

10.1.2 车舱舒适性评价标准

1948 年，Janeway 提出承受振动的人体舒适性评价标准，并给出了计算评价指标 J 值的计算公式；1957 年，德国学者 Dikman 提出了 K 系数法；1961 年，D. E. Goldman 等在试验和总结前人经验的基础上，提出人体在承受低频（0～100Hz）振动时，可简化为具有刚度、阻尼、质量的集中系统；1968 年，Pradko 等提出了吸收功率（AP）法；1972 年，德国米奇克提出用座椅垂直加速度的均方根值和整车纵向加速度的均方根值评价汽车的平顺性。20

世纪 60 年代，国际标准化组织开始着手制定“人体承受全身振动的评价指南”，并于 1974 年颁布了 ISO 2631—1974（E）国际标准，经过几次的补充和修订，成为 ISO 2631/1—1985。

1. 国际标准 ISO 2631

国际标准 ISO 2631 明确给出了振动频率、振动强度、振动方向以及暴露时间对人体感觉的影响；提出了用 1/3 倍频带分别评价方法和总加权值评价方法来计算评价指标。ISO 2631标准对汽车行驶平顺性的评价具有很大的指导意义，但同时也存在着一些不足之处。

1）舒适界限的规定与实际情况有不符之处。该界限表明：坐着的人在承受 4Hz 垂直振动时，均方根值为 0.89m/s^{2}的振动在 1min 内会产生不可接受的不舒适感，这与试验结果是不相符的。

2）暴露时间延长产生工效逐渐降低的假设缺乏试验依据。Bostrom Research Lab 的试验证明：振动对工效的影响在开始振动时几乎立即显现，并在 90min 内保持不变。

3）日本的北原索根据试验结果指出：ISO 2631 标准由于没有考虑相位的影响而欠妥。因此，国际标准化组织从 1984 年开始着手准备对 ISO 2631 进行全面修订。

2. 新国际标准 ISO/DIS 2631-1

1994 年 8 月，国际标准化组织颁布了新的国际标准 ISO/DIS 2631-1《机械振动和冲击 人体承受全身振动的评价》。新标准规定：在评价振动时，先计算各自由度上总的加权均方根值；再计算各输入点的振动加速度均方根；然后计算人体承受的总加速度均方根值；最后用总的振动加速度均方根值与人的主观感觉来判断乘员舒适性。

新标准基本上克服了原标准的缺点，在试验基础上给出了极为详细的频率加权函数、轴加权系数以及明确的舒适性界限；同时，还保留了大家熟悉的加速度均方根值作为评价指标，使用起来方便、直观，是迄今为止最为完善的评价方法。

我国在这方面研究工作起步较晚。20 世纪 80 年代初，长春汽车研究所、清华大学等首先采用 ISO 2631 国际标准进行了汽车道路行驶平顺性的研究；1982 年制定的《汽车悬架系统固有频率和相对阻尼系数的测量方法》、1985 年制定的《汽车平顺性随机输入行驶试验方法》和《汽车平顺性单脉冲输入行驶试验方法》，以及近几年的《客车平顺性评价指标及限值》等，初步构成了我国较为完善的汽车平顺性评价方法体系。

10.2　行驶平顺性设计

10.2.1　相关法规和客户需求

对驾驶人与乘客而言，行驶平顺性是由车身振动（主要是垂向的）的频率和振幅决定的，这些振动是他们的身体在行驶过程中感受到的。

人体对于某些频率的振动非常敏感，而且会因为这些频率的振动而引起不同程度的不适，包括急性晕车。顾客对于行驶平顺性的典型期望有：

- 完全避免那些令所有车内乘客感到烦恼或不适的振动现象。
- 汽车设计须考虑乘客有合适的身体活动空间。
- 驾驶人能够直接地感受到路况。
- 操控方便灵敏。

- 在所有的驾驶状态下有安全、舒适的乘坐环境。

除了人体通过地板和座椅所感受到的垂向振动，乘客还受到侧向和纵向振动以及一部分特殊的振动现象，比如，转向盘的扭转振动或变速杆的振动。图 10-1 显示了与客户相关的不同的振动现象，以及这些现象所处区域的加速度和频率。

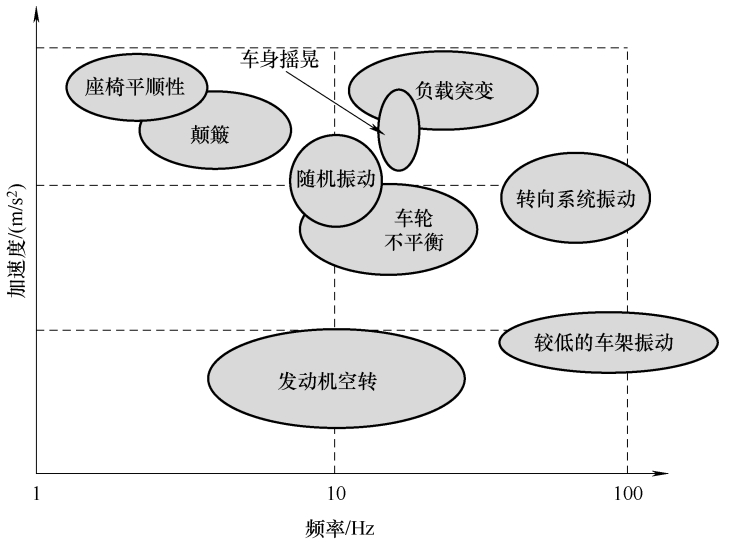


图 10-1　与客户相关的振动现象

不同的市场之间，客户对行驶平顺性的要求存在较大的差异。例如，欧洲顾客通常在路况良好的道路上以较高的车速行驶较短的距离，因此，他们更倾向于较硬的悬架系统和衬垫，以获得更直接的路面状况。而在美国，汽车通常在低速下行驶较长里程，因此驾驶人和乘客更希望较软的悬架系统，这样较大的阻尼会带来一个较高的舒适性。

因为在任何时刻垂向动力学都决定了汽车车轮与路面的联系，所以其也是纵向和侧向动力学的一个物理基础，同时是一个限制因素（对比 9.1.1 节和 9.1.2 节）。而且由于行驶平顺性仅仅是间接影响汽车的安全性或者排放，目前有关汽车法规并没有对行驶平顺性提出特别的要求。

10.2.2　行驶平顺性设计

车身的垂向振动（沿着 z 轴和绕着 x、y 轴）有两个物理源：

- 车轮沿着 z 轴方向的相对运动取决于路面与车轮间的动态接触，通过底盘和弹簧阻尼系统作用于车身。
- 动力和传动系统中旋转和振动零件的动态不平衡，通过动力和传动系统的悬置传至车身。

整车振动系统的全部特性，是由下列零件的黏弹性（刚度和共振频率）所决定的：

- 簧上质量（车身与内饰、发动机、传动系统等）。
- 簧下质量（车轮、轮胎、轮毂、制动装置等）。
- 旋转和振动质量（轴、活塞等）。
- 被动阻尼零件（内饰、弹簧阻尼系统、橡胶减振垫、减振器、吸振器等）。

- 主动控制系统（侧倾稳定、阻尼控制系统、可控发动机悬置等）。

图 10-2 表示了决定整车振动特性的黏弹性系统。

优化整车的振动舒适性，关键在于通过概念设计方法，确保整车，尤其是车身和底盘部件的共振频率远离激振频率，以使所有零件不会产生共振。有一条经验法则是保持频率与共振频率相距$\sqrt{2}$倍。图 10-3 举例说明了这种方法：车轮在起伏不平的路上滚动而激发（振动）。由于这些振动被传递到了车身、车轮和底盘系统的部件，并根据自身特征频率而振动。为了避免共振和不可控的振动，车身激发频率必须与共振频率的峰值有足够的距离。此时，客舱内乘客所感知到的最大振动程度是可以接受的。然而一旦车身的共振频率变得更低（如通过扩大车身顶部开口或者打开后端），由车轮所传递的激发频率可能符合车身较低的共振频率，此时会导致一种烦人的低频声响从车辆后端传来。

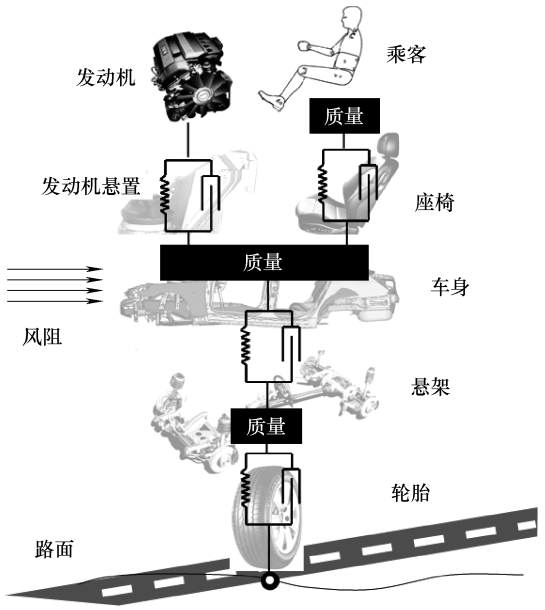


图 10-2　车辆黏弹性系统

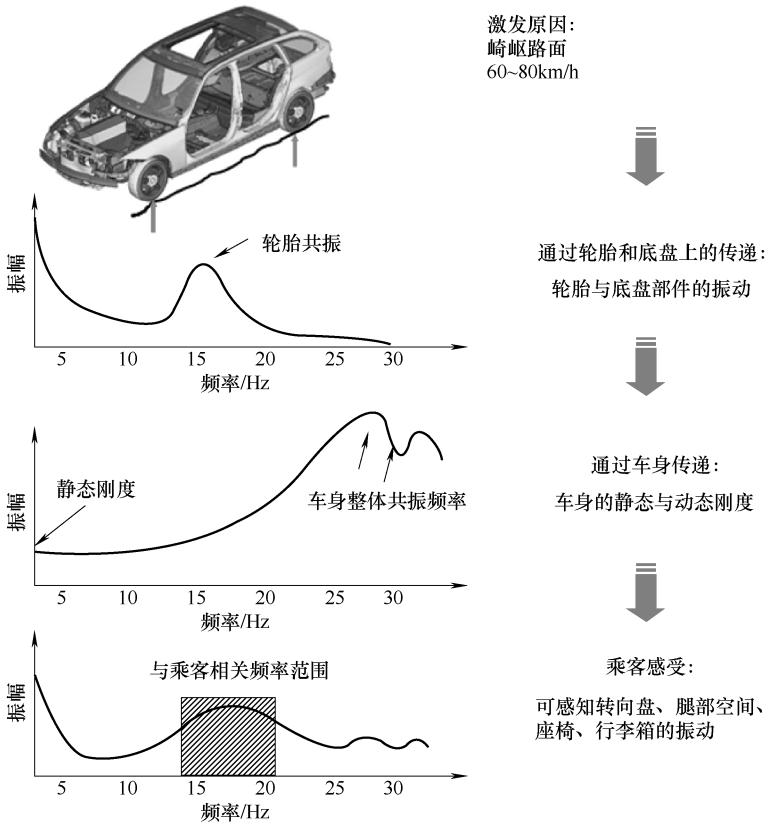


图 10-3　通过轮胎、底盘系统和车身所传递的振动

如果激发频率和共振频率的相差范围不能达到所要求的值（例如，当一台最初不在计划内的新型发动机被集成在一辆现有的概念车型上时），为使这两个频率有适合的差值，有可能修正的措施有：改变车身的刚度，或者利用支架和减振器来改变共振频率。

优化乘坐舒适性通常与汽车操作灵敏性目标有矛盾。用以解决这种冲突的设计方法包括：

- 载荷平衡，如使用可充气与放气的空气弹簧。
- 使用可调阻尼器系统。
- 使用主动弹簧或稳定器。

10.2.3 行驶平顺性验证

在材料和几何上的小改变都会增加或者减少一个零部件的共振频率，因此，作为整车的一个特征，汽车的行驶平顺性对于参数的变化非常敏感。对于每一种配置，这些配置是由多种不同的车身、发动机/变速器组合、弹簧阻尼系统、座椅甚至轮胎所构建的，而整车的特性可能完全不同，因此需要特定的集成。为了满足车辆行驶平顺性的要求，通常的方法是，指定一个特殊的弹簧阻尼系统，增加并调整被动减振元器件和调整主动控制系统的控制参数。

在早期阶段，为了在行驶平顺性方面评价汽车概念设计和随后的优化，车辆的动态反应可以通过使用一个如图 10-4 中展示的多体动力学系统（MBS）来模拟。

校验和优化汽车行驶平顺性的下一步骤是在水力脉冲测试平台上评估整车振动特性，这样可以在工作场所真实地模拟来自汽车驾驶的激振。测试中，驾驶人和乘客受到的振动是用振动假人测得的，假人可以实时监测水平与垂直方向振动的频率和振幅。通过增加、减少假人的重量，振动仿真可以得出代表不同群体的乘客的结果。图 10-5 展示了一种 MEMOSIK V 型振动虚拟机。

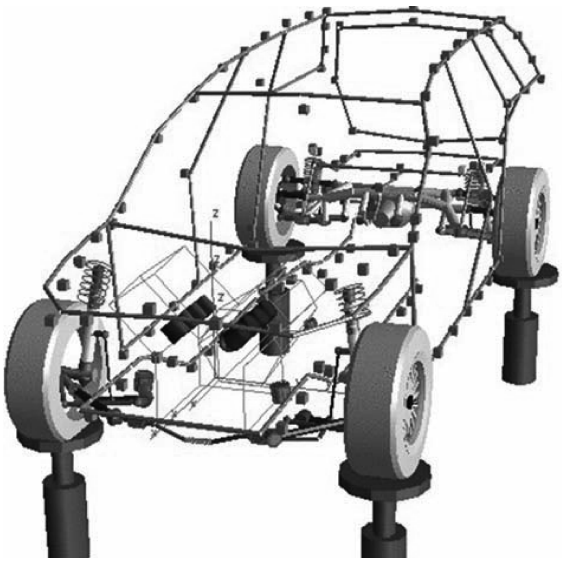


图 10-4 汽车振动多体动力学模型

图 10-5 振动测量虚拟机（来源：WÖLFEL）

无论如何，行驶平顺性的最后验证需要路试。高水平的测试驾驶人都会清楚地知道所感

受的现象与技术参数的联系。测试驾驶人要使行驶平顺性达到较高水平，以达到高档汽车的要求。标准化的测试跑道有坑洼、陡坡或是鹅卵石表面（图 10-6），这些跑道可以循环地与系统性地消除不期望的振动现象。

图 10-6　行驶平顺性标准测试轨道

10.3　声学舒适性设计

即使物理效应本质是相似的，可听到的和不可听到的振动（噪声），车内不同的乘员对此会有不同的感受，因此在整个开发过程中需要有区别地对待。

10.3.1　相关法规和客户需求

内部和外部噪声的物理声源尽管一样，然而顾客的要求及处理它们的方式有着显著的区别。对于外部噪声，主要的要求是保持其低于法定噪声排放水平（比较 10.3.3 节），同时，要有一个符合汽车特征和品牌价值的良好设计。相比之下，法律对于客舱内的噪声水平没有要求。但是内部噪声作为驾驶舒适性和主动安全的一个主要方面，是与客户高度相关的，且易被驾驶人和乘客感觉到。因此，特别是对舒适性要求较高的车辆，都要有严格、强制的内部噪声目标。

10.3.2　声学舒适性设计方法

声学舒适性需要在早期的概念设计就予以考虑，以避免在后期花费巨资做防噪声措施（隔声和制音器）以满足要求。对整车系统的内部声学进行优化需要识别和优化所有噪声源（通过结构和空气传播的），以及它们传到车舱内甚至传到乘客耳朵的途径。通常，在一辆

行驶中的汽车上有三种噪声源：

- 滚动噪声（由轮胎在路面上滚动产生）。
- 传动链噪声（发动机、进气口、排气管、变速器、驱动轴产生的噪声）。
- 风噪（空气在汽车上流动和通过冷却系统产生的噪声）。

表 10-1 列出了各部件及其主要噪声进入客舱的传播途径，以及可以采取隔声措施的位置。图 10-7 显示了通过对车身结构（这些结构是所有类型噪声的主要传播通道）的声学优化来降低汽车的内部噪声。

表 10-1　内部噪声的来源与决定因素

来　　源	决定内部噪声水平的因素	隔声措施位置
风噪	车身类型 车外后视镜形状 车窗玻璃厚度 车门种类 行李箱种类 密封类型	侧窗 顶篷 车身后部/行李箱 车身底部
滚动噪声	轮胎 底盘/悬架的类型 前轮/后轮驱动 轴承隔声 车身刚度	驾驶室 车身底部 车身后部 通风系统
传动链噪声	发动机空气-传播噪声 发动机结构-传播噪声 吸气噪声 消声器噪声 发动机/传动系统 发动机/变速器支架 变速器 传动轴/中心轴承 后桥/差速器 暖通空气压缩机/带传动	发动机盖 车身底部 车身后部 通风系统
辅助设备的噪声	ABS/DSC/CBC 动力转向 辅助加热 热循环阀 暖通空调盖 刮水器 风扇 燃油泵 车窗升降器 天窗开关 中央门锁 后视镜调校装置 座椅调校装置	

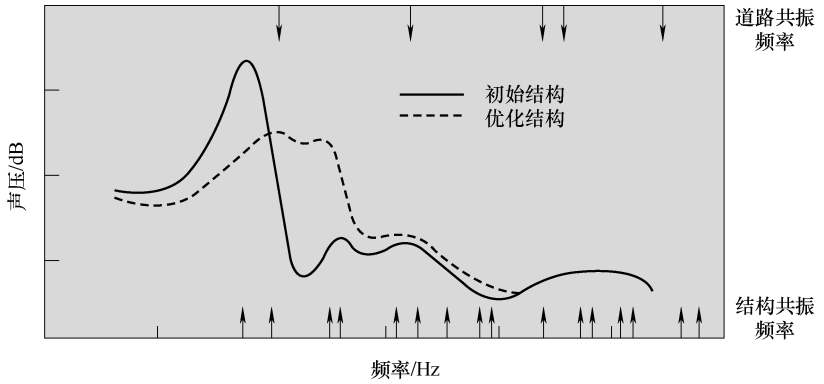


图 10-7　通过优化车身结构改善内部噪声水平

基于有限元的模态分析（图 10-8）可以识别结构的共振频率，并且可以在早期的产品开发过程中从概念上优化结构动力学，更进一步，优化降噪元件的布局。

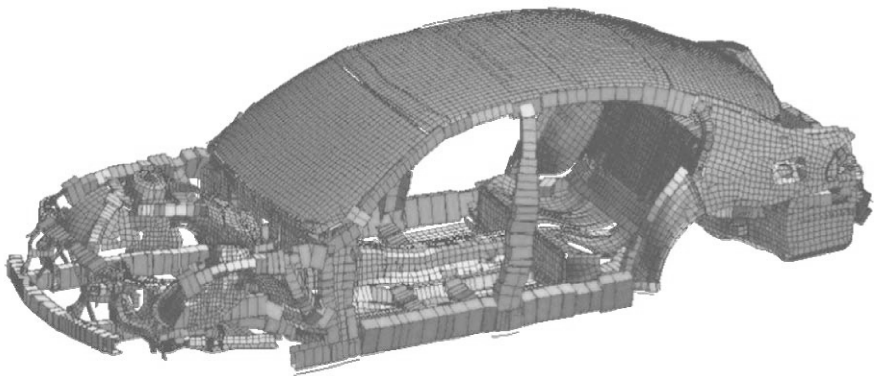


图 10-8　基于有限元模态分析的车身结构（来源：宝马）

被动降噪使用隔声或吸声元件，而主动降噪技术使用一种被称为去干扰的声学效应，这个效应是：一个声波与它的振幅与频率相同、运动方向相反的另一个波叠加时，相互抵消。这个效应在耳机中有着突出的效果，不过到目前为止还不足以令人信服，当前仅应用于本田、英菲尼迪等少数车型的主动降噪中。

模拟系统，例如，LMS 内部声学模拟虚拟实验室能够进行系统层面上的内部声学验证。在给定了几何、材料数据、边界条件和激励的条件下，可以对声学结构响应进行计算和可视化操作，由此可以在不进行任何硬件测试的条件下，在概念设计阶段就对其进行考量。

10.3.3　声学舒适性试验与验证

在过去的 20 年里，因轮胎滚动以及传动系统产生并进入客舱内的噪声已经被大幅度地减弱了。一部分原因是部件声学特性的改进，一部分原因是在传动路径上被吸收或隔离。因此，当速度超过 100km/h 时，风噪就会变成主要的噪声源，包括内部噪声和外部噪声。为了测试每个单独的外部构件对汽车风噪的影响，把它们置于气动-噪声风洞中分析，以使风噪从滚动噪声以及传动链噪声分离。图 10-9 展示了气动-噪声风洞工作原理。

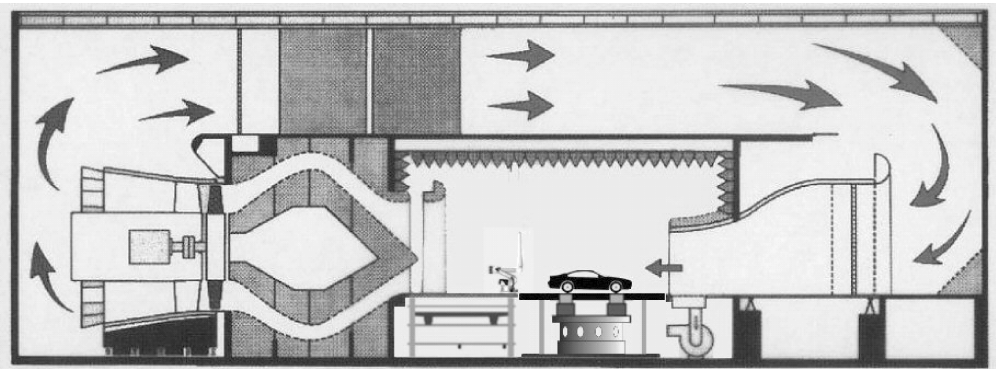
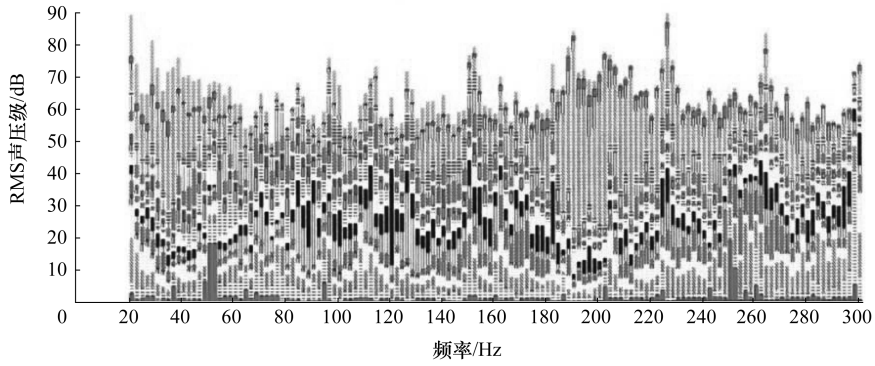


图 10-9　气动-噪声风洞工作原理（来源：宝马）

图 10-10 展示了一个测量室，汽车被置于出风口的前面接受测试。

为了对实际部件进行分析，首先使所有会产生噪声的外部边角部分（如车体缝隙、车窗密封垫、门把手）用胶带使其抵消。然后把完全粘贴好的汽车固定在风洞测试中心，这样一个纯风噪图谱就会被记录下来。再把胶带从第一个部件处撕掉。一个新的噪声图谱被记录，记录中的偏差可以体现第一个部件对气动-噪声的影响。然后，这个部件会再次用胶带粘好，所有其他部件也重复相同的步骤。最后，可以用获得的数据创建图 10-11 所示的分析图谱，其中的每一种颜色代表一个部件。这张图表清楚地展示风噪不仅会发出高频的嘶嘶声，而且更多的是大部分车身和装饰部分发出的低沉隆隆声，而这经常被人们所忽视。

图 10-10　气动-噪声风洞（来源：宝马）



上仪表板	下仪表板	前底板	后底板	后挡板	前驾驶舱	行李箱隔板	后驾驶舱
后轴	前风洞	后风洞	前车门	后车门	侧窗	B柱	C柱
顶篷	风窗	后车窗	行李箱地板	行李箱侧边	后梁	备胎	

图 10-11　汽车气动-噪声声谱（来源：宝马）

10.4　热舒适性设计

10.4.1　相关法规和客户需求

顾客需要一个对驾驶人和乘客来说都安全而舒适的乘坐环境，且不受当前外部天气条件的影响。然而，不同汽车舱内的温度舒适性功能有着巨大的差异，价格较低的车辆也许仅配备了一个基本的加热和除霜单元，而空调系统已经应用于大部分的中高级汽车了。提高舒适性水平可以通过附加特色实现，如空气净化单元，座椅的加热、冷却或是可以对每位乘客相互独立的空间设置温度、气流的功能，再或利用有效的先决条件，如通过驻车通风、加热和空调来实现。

用户所能感知的加热、通风、空调系统（HVAC）的主要性能指标包括：

- 舒适性：适宜的温度、空气湿度、温层（头部凉爽，脚部温暖）、无风和低噪的通风系统、空气质量（粒子、气味、氧气浓度）。
- 动力性：快速升温、降温、除霜、除雾。
- 稳定性：温度可控的合适温度区间。

10.4.2　车舱热舒适性设计方法

车舱内的温度舒适性是一种十分主观的感觉，影响这种感觉的因素十分繁杂（图 10-12）。

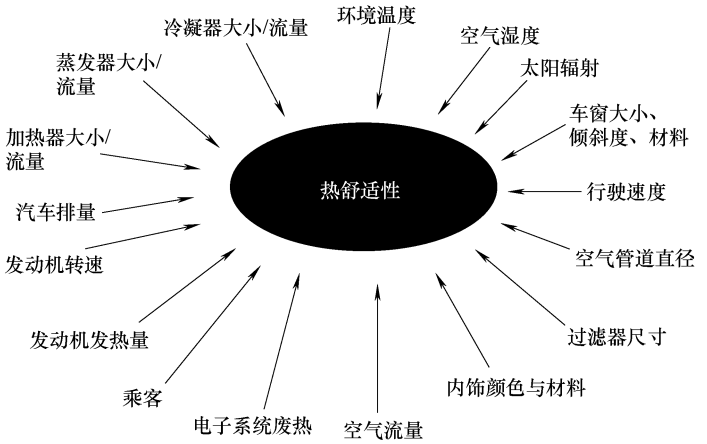


图 10-12　车舱温度舒适性影响因素

空调系统由四个子系统构成（加热单元、冷却单元、通风系统和控制系统），特别是通风系统（由风扇、热交换、控制阀门、空气管道组合而成），它是在几何学、热学和声学上的高度集成。以当前宝马 7 系的 HVAC 系统为例来说，图 10-13 描述了系统空气流动方案。

空气传导的质量可以通过以下几个方面衡量：

- 沿管道压力损失。
- 通风口气流分布。
- 车窗玻璃空气流速分布（除霜）。

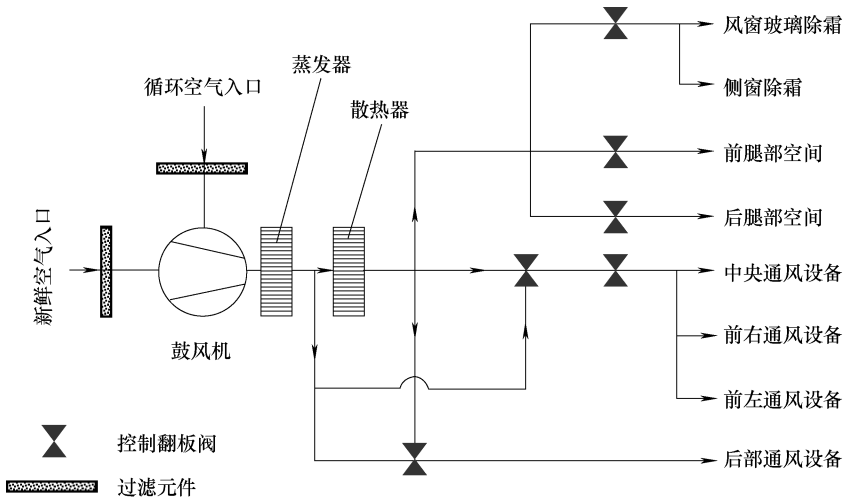


图 10-13　HVAC 系统空气流动图（来源：宝马）

- 对温度变化的反应。
- 工作噪声。

图 10-14 是与空气管道相符的 3D 布局，它表现了该系统在车舱中的几何布局。

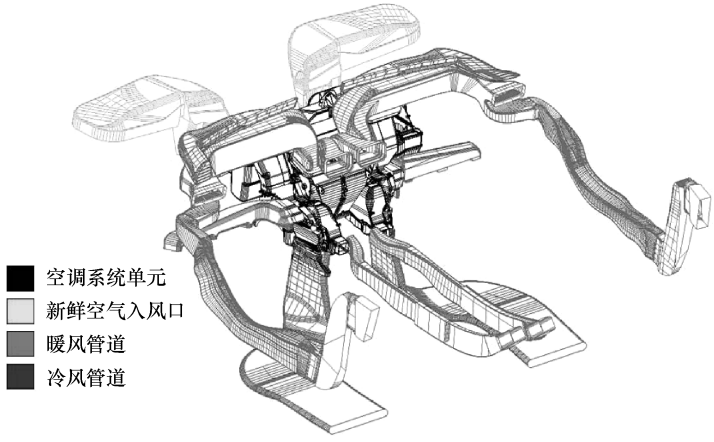


图 10-14　汽车空调系统空气管道布局（来源：宝马）

上述因素主要由管道的几何形状决定：管道的长度、截面形状以及沿管道的形状梯度。一般来说，管道的截面应该是圆的，或者至少也该是矩形，没有锋利的边缘，没有突变的截面形状、折角和波纹等。

10.4.3　热舒适性验证

仿真软件使得人们可以在早期就对与顾客相关的温度舒适性特点进行概念性验证。对于加热/制冷性能、空气流量、流速分布、温度分布、升温（被动）和降温性能或车窗除霜以及通风系统的预测正确性能达到 100%。图 10-15 展示了 *x-z* 平面剖视图，模拟了座舱的气流，显示了气体流动的温度、方向和速度。软件要求输入的数据包括座舱内部的几何形状和

空气管道，座舱包以及 HVAC 系统部件的规格数据（空气质量流动、加热和冷却性能）。

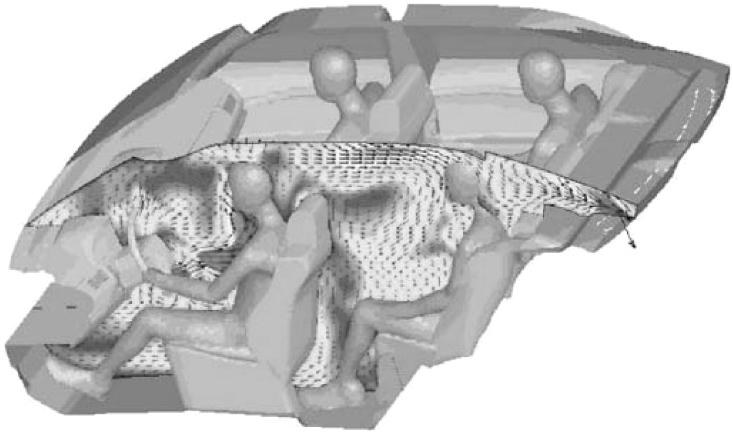


图 10-15　二维座舱气流模拟（来源：宝马）

要使真实的座舱热性能定量化的困难之处在于汽车必须行驶在一个可重复的环境条件下。解决方法是在一个气候测试展台的滚筒上进行测试。图 10-16 展示了操作流程。图 10-17 是一个真实的测试台架。

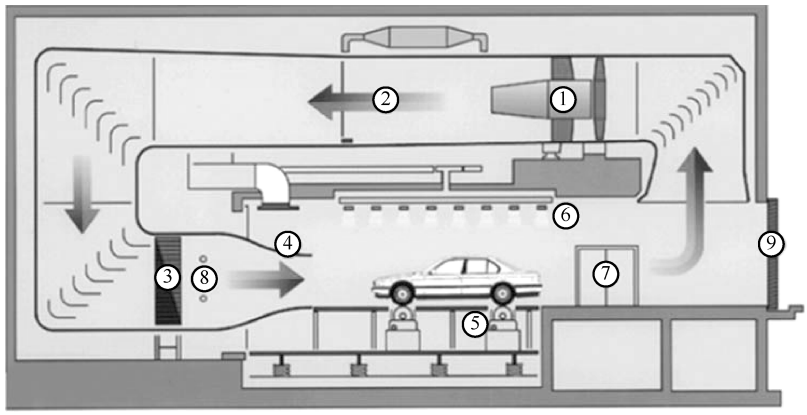


图 10-16　气候测试台架图（来源：宝马）

1—鼓风机　2—气流　3—热交换器　4—出风口　5—全轮驱动滚筒　6—日照灯
7—加油系统　8—空气湿度控制器　9—测试台架门

为了真实地验证舱内的温度舒适性，车辆需要在真实的极端天气条件下进行测试。为了绕开季节性的限制，汽车制造商会同时使用南半球和北半球的试验场地。酷热天气测试可以在夏季的希腊和冬季的非洲进行。图 10-18 显示在瑞典的冬季雪地测试（图 10-18a），以及在南非沙漠的酷热天气测试（图 10-18b）。

图 10-17　舱内气温测试台架（来源：宝马）

a) b)

图 10-18 极端气候测试

10.5 新车价值感知与体验

10.5.1 新车价值顾客体验

由车舱内饰设计决定的舒适性已经在 4.3 节提到过：汽车内饰表面的轮廓和形状、控制器和显示面板的位置，驾驶人和乘客的人机工程学或底盘和车座的实际布局的设计特点对每一款车型来说都是不同的。但是，为了体现整体的价值感，车辆的内部设计必须下更大的功夫，必须集成专用性、真实性与舒适性的经验。在高端汽车市场，顾客期望通过他们的全部感官来感知这个层次的汽车的价值。这些价值是通过看、听、嗅与触摸车辆表面空隙、显示面板、控制单元等装置，感知其性能得到的。通常顾客感知的新车价值品位包括：

- 表面：具有一个完美的车身表面轮廓，亮点在于不同材料之间的连接具有平滑和谐的流线性。车身表面及颜色保持均匀一致。具有一致的材料概念。独特的材料具有真实的外观和触感。不易划伤。
- 显示面板和控制单元：显示面板和控制装置保持设计理念一致，包括夜晚时间显示。显示面板具有较高的可读性和图形连贯性。控制单元在听觉和触觉上具有清晰而连贯的功能。
- 结合部位与间隙：所有的接合处都是一样宽的，并且在任何角度都是平行的。直接连接的部件配合良好。
- 整体印象：从车架、底盘的连接处和空腔处不应该看到任何其他部件。
- 操作声音：操作和制动时会传来轻快而独特的声音。
- 车舱内不可或缺的气味：天然材料的嗅觉感知，如皮革和木材。没有烦人的气味(如混合物蒸发的气味)。

将来，高标准的价值认知度不仅仅只限于高级汽车。一个明确的趋势是，在大众市场中顾客期望他们感受到的新车价值和产品质量保持一致。

10.5.2 新车价值品位提升

为提升价值品位而进行的设计意味着要考虑每一个细节。色彩、表面、气味和声音全部

遵循一个共同的模式，它能体现出这个品牌和这款汽车的特色。为了达到这个目标，汽车制造商通常会定义一些设计规则，负责汽车内饰和系统的设计师必须遵守这些规则。其中一些设计规则举例如下：

- 表面看上去相同，摸上去也必须一样。
- 汽车上任何地方都不能同时有三个以上不同的表面。
- 互不相同的操作部件必须有不同的操作反馈。
- 直接相连部件的几何形状必须保持平衡以及完全对齐的外表。
- 固定件通常是不可见的。
- 显示面板中的字体、字体大小、字体样式、字体颜色、位置要保持一致，并且有白天和晚上的区别。
- 操作声音，如关门或调校座椅的声音要与定义的声音模式相匹配。

10.5.3　新车价值体验与验证

现在，强力的渲染方法能逼真地再现 3D CAS 模型，这使得设计师只需付出极少的现实投入即可快速地对不同设计的汽车进行预先评估。光影效果、表面纹理等一系列都可以表现出来，效果堪比照片。图 10-19 展示了如照片般逼真的宝马 6 系变速杆的图形，从这张图中可以对各个表面特性如光影效果进行现实评估。

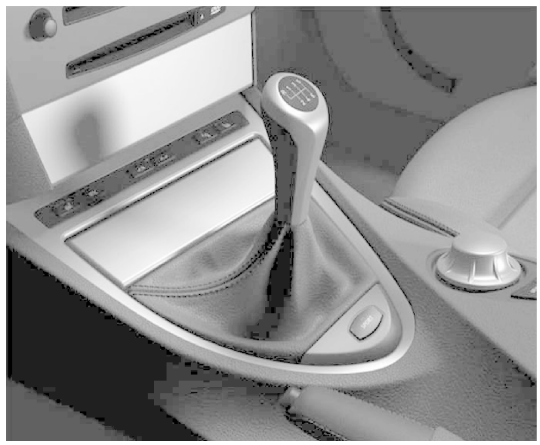


图 10-19　内饰件的视觉效果（来源：宝马）

对比视觉外观，操作声音、触觉感知或气味只能在一个真正的汽车和它的表面、材料、操作装置与显示面板上进行评估，那时汽车已进入生产阶段了。现在面临的难题是各自的设计特色，如纹理，这只能在开发阶段的末期进行。

第11章

汽车驾驶安全性设计

11.1 概述

11.1.1 汽车安全性概述

汽车安全性（automobile safety）是指汽车在行驶中避免事故、保障行人和乘员安全的性能，一般分为主动安全性、被动安全性、事故后安全性和生态安全性。在道路交通事故中，汽车本身的安全性能也是不可忽视的因素。汽车安全性能好，往往可以避免事故的发生或降低伤亡的程度。

作为整车特性之一的汽车安全性，是指车辆在事故中降低危险的能力（主动安全），以及事故发生时避免和减少对乘客和车辆的伤害的能力（被动安全）。为了使汽车尽可能地安全，在汽车开发阶段需要一个综合全面的安全战略，来考虑逻辑链中的所有可能导致事故发生的部分。图 11-1 给出了汽车驾驶过程以及主（被）动安全性划分原则。

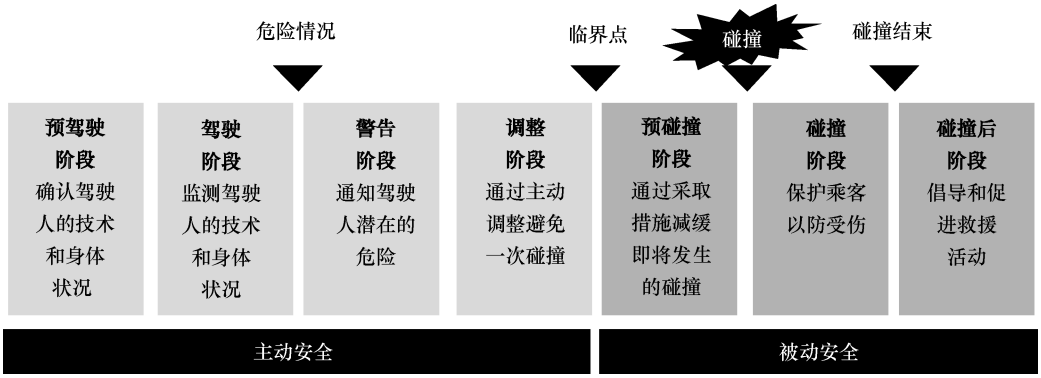


图 11-1 汽车驾驶过程中的安全性划分原则

从汽车与障碍物首次接触开始，正面碰撞后引发的一系列事件如下：正面碰撞 15 ~ 30ms 后，通过传感器检测到汽车加速度达到或超过一定的阈值后指示碰撞状态和类型。协同其他设备如安全带预警装置，安全气囊控制单元在 20 ~ 30ms 内点燃烟火使气体爆炸，使得安全气囊膨胀。乘客与膨胀的安全气囊接触后，安全气囊内部的气体通过很小的通风孔泄漏气体来减小膨胀速度，防止对乘客造成伤害。安全气囊的扩充与膨胀作为整个碰撞过程一系列事件的序列，如图 11-2 所示。另外的安全措施包括打开车门以便营救，或者断开电池和关闭油泵防止短路火花点燃燃料引起火灾。

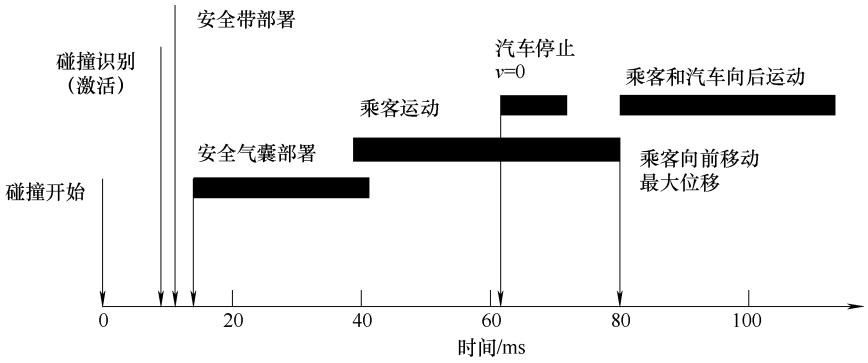


图 11-2　在碰撞中发生的一系列事件（来源：宝马）

11.1.2　汽车安全性分类

汽车安全性一般分为主动安全性、被动安全性、事故后安全性和生态安全性。

1. 汽车主动安全性

汽车主动安全性又称汽车积极安全性，主要是指汽车防止或减少道路交通事故发生的性能。其中主要包括视认性、驾驶操作性和制动效能。此外，还包括减轻驾驶人的疲劳程度、行人的安全性等。

1）视认性是指可以看见和看清道路、其他车辆、交通信号及仪表的程度。

2）驾驶操作性是指驾驶操作方便、灵活的程度。

3）制动效能是指汽车在高速行驶中进行制动的能力。不仅要能减速和停车，而且不能出现跑偏、侧滑、甩尾等现象。

2. 汽车被动安全性

汽车被动安全性又称消极安全性，是指事故发生时减少乘员伤亡的能力。其中主要包括结构吸能性、内饰软化、安全防护装置及安全玻璃等。

1）结构吸能性是指汽车在发生碰撞时，汽车结构吸收大部分冲击能量，从而保证座舱变形最小，不挤伤乘员的能力。要求汽车以 48km/h 的速度与固定障碍物正面碰撞时，乘员不致危及生命。为了满足这一要求，汽车应当有一个可变形而吸收能量的车头结构，并有一个有足够刚性而且形状稳定的座舱。通常将汽车头部的刚度设计得小于座舱的刚度，使头部尽量吸收碰撞时产生的冲击能量。为此，在汽车设计中，采用计算机辅助工程，用有限元分析的方法设计车身的结构，并且对新开发的车型进行上百次碰撞试验，以确保汽车达到上述要求。通常在汽车侧面车门设有加强刚性的横梁，以防止车门在碰撞后变形。

2）内饰软化。汽车座舱内部的各种元件表面无凸起，材质柔软有弹性，尽可能减少尖角、棱角和突出的零件，在发生碰撞时能减少乘员所受的伤害。内饰软化的范围包括转向盘、仪表板、侧围、顶篷、座椅、地板以及遮阳板等突出的附件。有的汽车转向盘在碰撞时可以收缩，有的座椅加有头枕，以防后部被撞时头部受伤。

3）安全防护装置。

4）安全玻璃。玻璃受碰撞后只裂不碎，或碎块不呈尖角，可以减少对乘员或行人的伤害。同时，在碰撞后玻璃仍能保持一定的能见度，避免妨碍驾驶人的视线而造成第二次事

故。在汽车撞上行人时，安全玻璃也可以减少对行人造成的伤害。

3. 事故后安全性

事故后安全性是指汽车能减轻事故后果的性能。主要包括能否迅速消除事故后果，同时避免新的事故发生，并且碰撞后系统用来尽快帮助受伤人员。在一个碰撞实例中，例如，通用汽车公司子公司安吉星（OnStar）的先进自动碰撞通知装置（AACN），利用汽车上的分布式传感器，能够检测很多重要的信息，如精确的位置、碰撞类型和受伤程度、乘员人数、安全气囊配置等。然后，这些信息被发送到车辆紧急呼叫中心，再转发到相应的紧急调度中心。这些早期信息使得紧急中心和医疗服务部门提前做好最佳的救护与医疗准备工作。欧盟的 eCall 自动紧急呼叫系统功能相似，在 2010 年开始使所有成员国都能够接受该系统快速有效的自动救助。

4. 生态安全性

生态安全性是指发动机排气污染、汽车行驶噪声和电磁波等对环境的影响。

11.1.3 汽车安全性影响因素分析

1. 汽车安全性的基本配置

在价格上微型车和豪华车相去甚远，对于坐在里面的人而言，他们的生命权却是等值的。抛开价格因素，一辆“安全车”应达到的最基本标准是：

- 前后盘式制动系统。
- 前排双气囊。
- 三点式安全带。
- 安全玻璃。
- 高位制动灯。
- ABS + EBD（制动防抱死和电子制动力分配系统）。
- 车头、车尾可溃缩的安全车身设计，车门内有防撞杆。
- NCAP 碰撞测试成绩。

2. 非车辆影响因素

通常对于汽车驾驶行驶的安全性，不仅局限于汽车的结构特点和技术性能，其他因素也决定着汽车驾驶的安全性，例如：

- 交通规则，如速度限制、通行规则、允许的血液中酒精的含量等。
- 道路基础设施，如路面、路型、指示牌、照明、柱梁的保护装置、铁路警示等。
- 驾驶人的成熟程度：最小驾驶年龄、获得驾驶证的要求、强制交通安全违法行为等。

11.2 汽车安全性技术法规和标准

汽车标准和技术法规既维护了社会利益，也直接影响着汽车产品的开发、生产和销售，所以世界各国及生产商对汽车法规的研究都十分重视。此外，中国、加拿大、澳大利亚、沙特阿拉伯、新加坡、中国香港等国家和地区都有自己的汽车法规，但这些法规基本上都是参照美国法规或欧洲法规再结合本国具体情况制定的。日本汽车法规近些年来也逐渐向欧洲法

规靠拢。随着国际交流的频繁，在世界范围内汽车法规必然要求简化和统一。

11.2.1　新车被动安全性强制性评估

当前，世界上主要的汽车法规有欧洲 E-NCAP、日本 J-NCAP、美国 NCAP IIHS（美国公路安全保险协会）和 NHTSA（美国高速公路安全管理局）两套标准以及中国新车评价规程（C-NCAP），这五种新车碰撞测试标准的测试项目见表 11-1。在所有市场上，新车被动安全性能指标必须满足最低的法定安全标准，这是车辆注册所必须满足的法律要求。

表 11-1　五种新车碰撞测试标准的测试项目

	中　国	欧　洲	日　本	美　国	
	C-NCAP	E-NCAP	J-NCAP	IIHS	NHTSA
正面碰撞试验	正面 100% 重叠刚性壁障（50km/h）	无	正面 100% 重叠刚性壁障（55km/h）	无	正面 100% 重叠刚性壁障（56km/h）
	正面 40% 重叠可变形壁障（64km/h）	正面 40% 重叠可变形壁障（64km/h）	正面 40% 重叠可变形壁障（64km/h）	正面 40% 重叠可变形壁障（64km/h）	无
	无	无	无	正面小范围重叠碰撞试验（64km/h）	无
侧面碰撞试验	可变形移动壁障（50km/h）	可变形移动壁障（50km/h）	可变形移动壁障（55km/h）	可变形移动壁障（50km/h）	侧面可移动壁障 27° 碰撞试验（61km/h）
	无	柱状物侧面碰撞试验（29km/h）	无	无	75° 侧面柱碰试验（32km/h）
行人保护测试	无	行人保护测试（40km/h）	行人保护测试（35km/h）	无	无
车顶强度试验	无	无	无	车顶静压测试	翻滚概率测试
后碰颈部保护试验	有	有	有	有	无

从 2006 年开始，中国新车评价规程（C-NCAP）借鉴了欧洲 E-NCAP 的流程，对中国在售的车型进行安全性测试。由于评价规程起步晚、跟进慢，其测试难度对很多新车来说毫无压力。2018 版的 C-NCAP 新规程即将到来，新规程里最重要的变化是增加了行人保护和主动安全两大项的测试，而且乘员保护方面也进行了部分升级，但依然没有跟上 E-NCAP 评价规程的步伐，测试项目少于 E-NCAP，而且没有顾及儿童乘客的安全问题。

11.2.2　新车被动安全性非强制性评估

许多客户希望他们购买的车辆能超过这些最低标准，并希望在购车之前获得对车辆安全性能的定量评价。有关车辆被动安全性的全方位非强制性测试项目由独立于整车制造商的代表负责制定，这些代表分别来自政府、汽车集团和保险公司等组织。在欧洲，新车评估组织

（NCAP）根据车辆在标准碰撞测试中的表现授予星级。

新车被动安全性非强制性评估主要碰撞试验项目如下。

1. 正面 100％重叠刚性壁障碰撞实验

试验车辆 100％重叠正面冲击固定刚性壁障。碰撞速度为 50～51km/h（试验速度不得低于 50km/h）。试验车辆到达壁障的路线在横向任一方向偏离理论轨迹均不得超过 150mm。在前排驾驶人和乘员位置分别放置一个 Hybrid Ⅲ型第 50 百分位男性假人，用以测量前排人员受伤害情况。在第二排座椅最右侧座位上放置一个 Hybrid Ⅲ型第 5 百分位女性假人，用以考核安全带性能。

2. 正面 40％重叠可变形壁障碰撞实验

试验车辆 40％重叠正面冲击固定可变形吸能壁障。碰撞速度为 56～57km/h（试验速度不得低于 56km/h），偏置碰撞车辆与可变形壁障碰撞重叠宽度应在 40％车宽 ±20mm 的范围内。在前排驾驶人和乘员位置分别放置一个 Hybrid Ⅲ型第 50 百分位男性假人，用以测量前排人员受伤害情况。在第二排座椅最左侧座位上放置一个 Hybrid Ⅲ型第 5 百分位女性假人，用以考核安全带性能。图 11-3 显示了欧洲新车评估正面碰撞的测评参数。

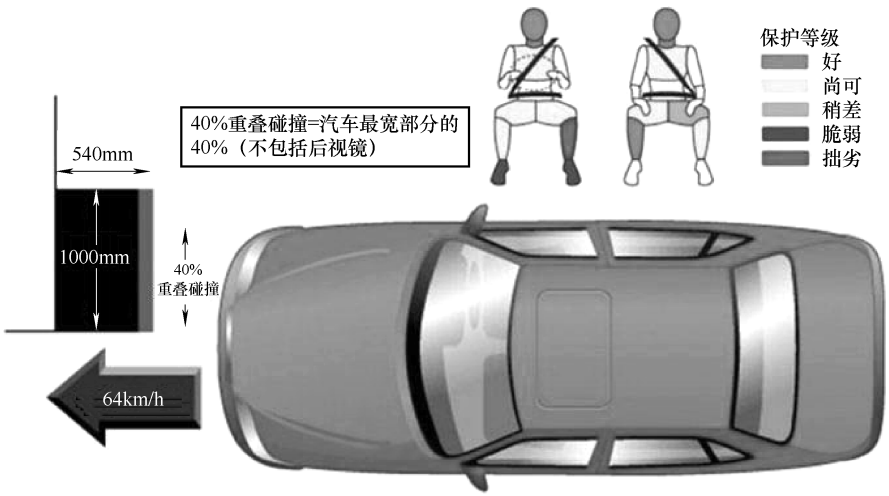


图 11-3　欧洲 NCAP 正面 40％重叠可变形壁障碰撞试验和评估分级

3. 可变形移动壁障侧面碰撞实验

移动台车前端加装可变形吸能壁障，冲击试验车辆驾驶人侧。移动壁障行驶方向与试验车辆垂直，移动壁障中心线对准试验车辆 R 点，碰撞速度为 50～51km/h（试验速度不得低于 50km/h）。移动壁障的纵向中垂面与试验车辆上通过碰撞侧前排座椅 R 点的横断垂面之间的距离应在 ±25mm 内。在驾驶人位置放置一个 EuroSID Ⅱ型假人，用以测量驾驶人位置受伤害情况。图 11-4 显示了欧洲新车评估侧面碰撞的测评参数。

4. 行人保护测试

除了碰撞试验，欧洲新车评估组织的测试还包括评估儿童和成人行人在事故中可能受到的伤害程度。如图 11-5 所示，在这些测试中，根据行人涉及小腿、大腿和头部受伤情况，对车辆前车身的不同部分进行了评估。

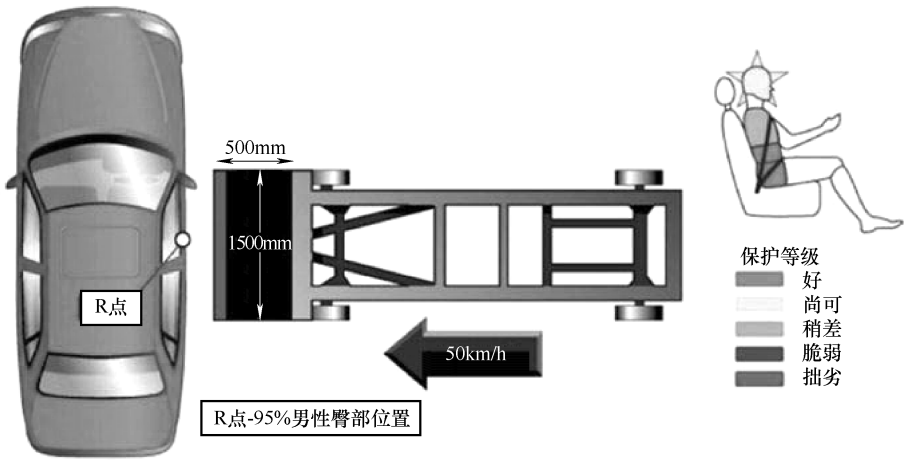


图 11-4　欧洲 NCAP 侧面可变形移动壁障碰撞试验和评估分级

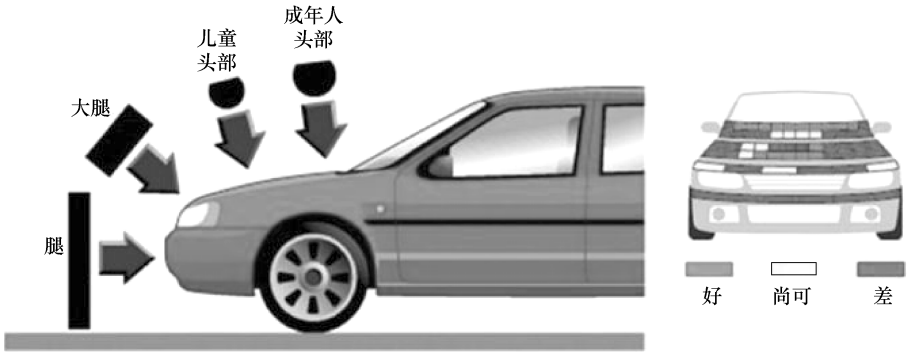


图 11-5　欧洲 NCAP 保护行人的评级（来源：欧洲 NCAP）

最终，欧洲新车评估组织的综合得分为累计在十种不同的测试类型中，车辆获得的总分——分布在三个实际的碰撞试验中（正面碰撞、壁障侧面碰撞、柱体侧面碰撞）。表 11-2 列出了这些测试类别以及每个类别的最大分值。所有最大分值的总和为 36 分。

表 11-2　欧洲新车评估组织评分表

碰撞测试	受伤区域	最大分值
正面碰撞	头部、颈部	4
正面碰撞	胸部	4
正面碰撞	膝部、股骨、盆骨（即左右股骨和膝关节）	4
正面碰撞	腿部、足部（即左右小腿、足部和膝盖）	4
侧面碰撞	头部、颈部	4
侧面碰撞	胸部	4
侧面碰撞	膝部、股骨、盆骨（即左右股骨和膝盖滑块）	4
侧面碰撞	腿部、足部（即左右小腿、足部和膝盖）	4
侧面柱撞	头部、颈部	2
行人		2

最后的星级（5 星到 0 星）从总得分和正面碰撞与侧面碰撞得分的稳定性之间得出（表 11-3）。

表 11-3 欧洲新车评估组织星级对照表（来源：欧洲 NCAP）

星 级 数	所需最少总得分	单项所需最小得分
5	33	13
4	25	9
3	17	5
2	9	2
1	1	
0	0	

美国、日本和其他市场也存在新车评估组织。在美国，对新车的不同碰撞评估由美国国家公路交通管理局（NHTSA，美国新车评估组织）和美国公路安全保险协会（IIHS，一个由汽车保险公司资助的非营利性组织）负责实施。然而新的 IIHS 碰撞试验和欧洲新车评估组织是很相似的，只是在总体环境、障碍物类型、错移、人体模型和评级上有所不同。与欧洲新车评估组织相比，美国新车评估组织评出的等级代表了一种严重受伤的可能性，一星代表 25% 的可能性，五星代表 5% 的可能性。这种分歧可能导致一辆完全相同的车在欧洲和美国获得不同等级。而根据美国“临界点”网站最新报道，防撞系统有望纳入美国新车标配。

为了达到全球化安全性要求相一致的目标，全球新车评估组织将测试流程国际化——虽然欧洲和美国新车评估组织的发展是逐渐偏离的。

作为独立于汽车制造商的汽车被动安全性指标，新车评估测试（NCAP）的评级逐渐成为影响全球消费者购买新车的因素之一。汽车制造商将各个测评试验的要求融合到他们的设计中，宣传正面的评级也作为一种营销策略。

另外，不良的被动安全性测评同样对汽车市场和销量产生最直接的影响：2007 年 6 月，德国汽车协会（ADAC）发布了新推出的尊驰（Brilliance）BS6 进行欧洲新车评估组织正面碰撞测试（图 11-6）的测评结果，使得尊驰 BS6 新车不得不重新调整在欧洲市场的推广策略。

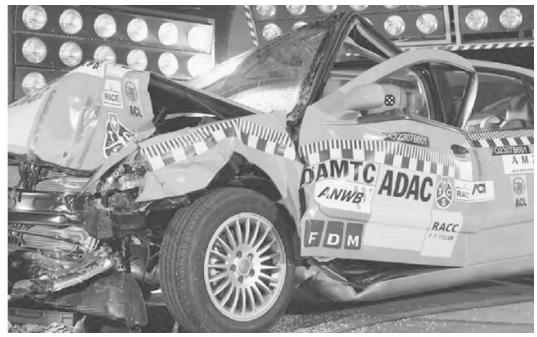


图 11-6 欧洲 NCAP 标准正面碰撞后驾驶室崩塌

然而新车评估测试（NCAP）评定的等级不总是车辆安全性的绝对指标。例如，对安全带预警能力的要求，对于一个总是小心谨慎地系安全带的驾驶人来说，一辆车上有没有安全带预警器（最高四星）对安全性并无太大的影响。

11.3 汽车主动安全性设计

11.3.1 汽车主动安全性技术法规与标准

顾客对于主动安全性的要求在最大程度上被纳入到其他的整车特征中（在前面已有论述）：

• 车身设计，如通过形状和颜色的设计来提高可见性，通过车身的设计来提高驾驶人的视野（4.1 节）。

• 乘坐舒适性，如通过控制噪声等级、热舒适性或纵向动力学来增强驾驶人的警觉性（10.2 节）。

• 信息娱乐性，如通过人体工程学的显示和控制来减少驾驶人分心，通过交通信息和先进的支持系统来提高驾驶人的警觉性（13.1 节）。

• 操纵性，如通过缩短制动辅助系统的制动距离，或者通过 ABS 和 ESC 来提高避开障碍物的能力（9.3 节）。

11.3.2　汽车主动安全性设计方法

针对汽车主动安全性的综合评价体系，汽车行业在相应的主动安全性环节加大投资力度，开展关键技术的研究及试验，现已成熟的技术如制动防抱死系统（ABS）、驱动防滑控制系统（ASR）、电控行驶稳定系统（ESP）等。

1. 制动防抱死系统（ABS）

制动防抱死系统（Anti-locked Braking System，ABS）是一种具有防滑、防锁死等优点的汽车安全控制系统。ABS 是在常规制动装置基础上的改进型技术，可分机械式和电子式两种。现代汽车上大量安装制动防抱死系统。ABS 既有普通制动系统的制动功能，又能防止车轮锁死，使汽车在制动状态下仍能转向，保证汽车的制动方向稳定性，防止侧滑和跑偏，是目前汽车上最先进、制动效果最佳的制动装置。ABS 主要是借助先进的传感器技术测试车轮的转速，并通过车载自控系统计算车轮滑移率来判定车轮是否抱死，由执行系统在制动过程中自动调节各车轮的制动力，使车轮在狭小的理想范围内滑移并停止下来，且车轮不会抱死。当前，几乎所有乘用车均已配置了制动防抱死系统（ABS）。

2. 驱动防滑控制系统（ASR）

驱动防滑控制系统（Acceleration Skid control system，ASR），顾名思义就是防止驱动轮加速打滑的控制系统，其目的就是要防止车辆在起步、加速时驱动轮打滑，以维持车辆行驶方向的稳定性，保持较好的操控性及最适当的驱动力，达到理想的行车安全性（图 11-7）。ASR 能时刻反馈车辆行驶信息，运用数学算法和控制逻辑使车辆驱动轮在恶劣路面或复杂输入条件下产生最佳纵向驱动力。ASR 能够间接提高车辆的牵引性、操纵性、稳定性，减少轮胎磨损和事故风险，增加行驶安全性和驾驶轻便性，使得汽车在附着状况不好的路面上能顺利起步和行驶，所以该技术目前得到大力推广并在多款高档轿车中得以应用。

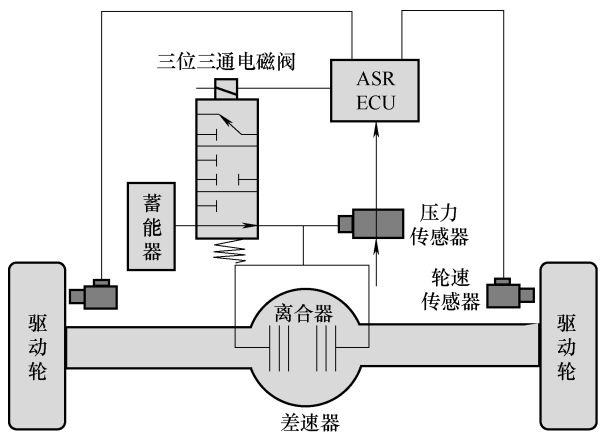


图 11-7　驱动防滑控制系统（ASR）工作原理

3. 电控行驶稳定系统（ESP）

电控行驶稳定系统（Electronic Stability Program，ESP）综合了 ABS、BAS 和 ASR 三个系

统，功能更为强大。ESP 可以使车辆在各种状况下保持最佳的稳定性，尤其在转向过度或转向不足的情形下效果更加明显，如图 11-8 所示。

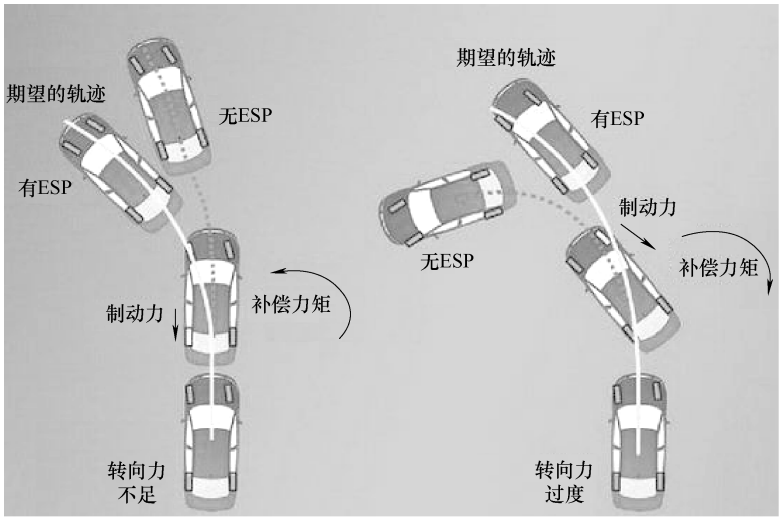


图 11-8　电控行驶稳定系统（ESP）工作原理

该系统将汽车的制动、驱动、悬架、转向、发动机等主要总成的控制系统在功能、结构上有机地结合起来，使汽车在各种恶劣工况下都有最佳的行驶性能。通过实时控制轮胎与路面之间各种作用力的均衡来保持车身稳定：轮胎通过纵向、横向滑转来传递地面施加的纵向力和侧向力，进而迅速改变汽车的运动并保持其稳定性。根据附着椭圆理论，轮胎的纵向附着力和侧向附着力是矛盾的关系。ESP 通过对每个车轮滑动率的精确控制，使各个车轮的纵向分力和侧向分力迅速改变，从而在所有工况下均能获得所期望的操纵稳定性。

4. 电子制动力分配系统（EBD）

电子制动力分配系统（Electric Brakeforce Distribution，EBD）根据由于汽车制动时产生轴荷转移的不同，而自动调节前、后轴的制动力分配比例，提高制动效能，并配合 ABS 提高制动稳定性。汽车在制动时，四只轮胎附着的地面条件往往不一样。

EBD 的工作原理就是用高速计算机在汽车制动的瞬间，分别对四只轮胎附着的不同地面进行感应和计算，得出不同的摩擦力数值，使四只轮胎的制动装置根据不同的情况用不同的方式和力量制动，并在运动中不断保持调整，使制动力与摩擦力相匹配，从而保证车辆的平稳，如图 11-9 所示。

从工作原理来讲，它是 ABS 的一个附加作用系统，可以提高 ABS 的效用，共同为行车安

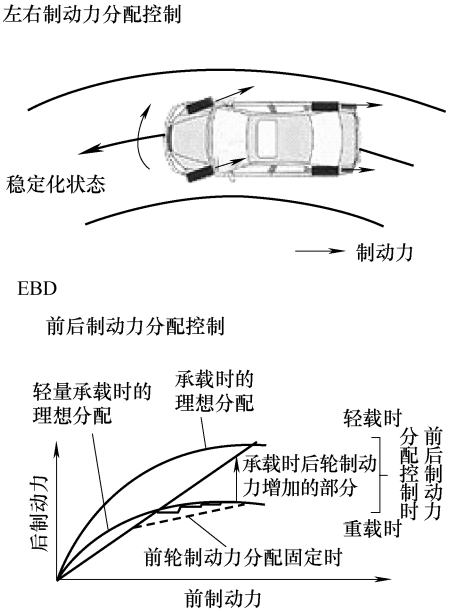


图 11-9　电子制动力分配系统（EBD）

全添加筹码。所以在安全指标上，汽车的性能又多了“ABS + EBD”。在紧急制动车轮抱死的情况下，EBD 在 ABS 动作之前就已经平衡了每一个车轮的有效地面附着力，可以防止车辆甩尾和侧移，并缩短了汽车的制动距离。

5. 电子控制制动辅助系统（EBA）

电子控制制动辅助系统（Electronic Brake Assist，EBA）是一种汽车紧急制动辅助系统。它通过驾驶人踩踏制动踏板的速率来理解制动行为，如果它察觉到制动踏板的制动压力恐慌性增加，EBA 会在几毫秒内启动全部制动力，其速度要比大多数驾驶人移动脚的速度快得多，如图 11-10 所示。EBA 可显著缩短紧急制动距离并有助于防止在停停走走的交通中发生追尾事故。驾驶人一旦释放制动踏板，EBA 系统就转入待机模式。由于更早地施加了最大的制动力，紧急制动辅助装置可显著缩短制动距离。

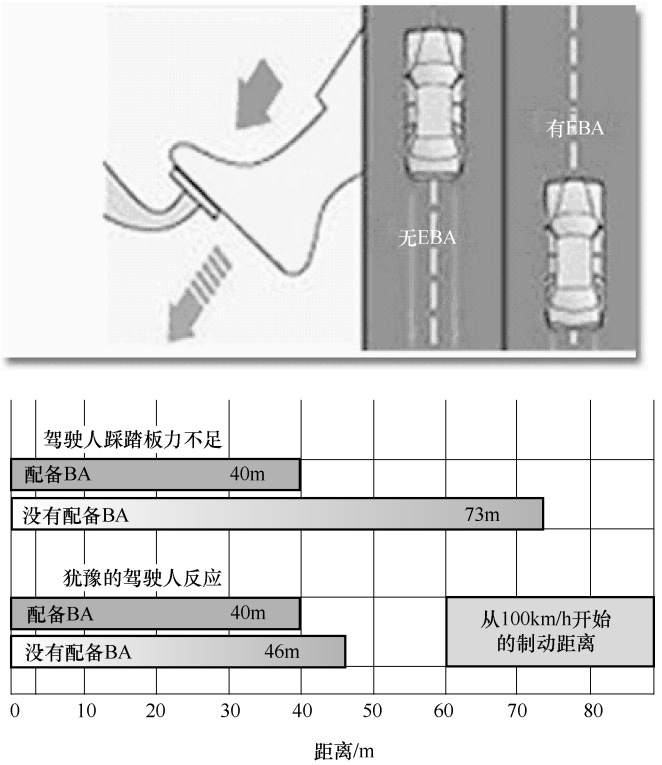


图 11-10　电子控制制动辅助系统（EBA）工作原理

EBA 是先进的汽车电子产品，由传感器、执行器和控制器组成。核心的执行器是车内的电子真空助力器（Electronic Vacuum Booster，EVB）。其作用原理是在制动主缸上安装一个压力传感器，通过压力传感器感知驾驶人是否进行紧急制动行为。如果是紧急制动，车载控制计算机会启动电子真空助力器内部的电磁机构，迅速将制动压力提升至助力器的最大伺服点。双膜片电子助力器在 0.4s 内可达到助力器的最大伺服压力。

EBA 的本质是实现车辆的线控制动功能。当 EBA 配合有长程雷达、激光雷达或其他视觉系统时，可以实现车辆的自适应巡航系统功能、主动避撞功能等。

6. 防追尾系统

防追尾系统（precrash system）不但可以防止高速公路汽车追尾，而且具有防止对面碰撞、绕过障碍物、防止汽车撞人等许多优点。随着技术的不断完善，该系统可以满足更多的要求。主动防追尾系统是在车辆的前端装上传感器、雷达、摄像机等设备，能够自动探测出与前车的距离，并与本车的制动、灯光等系统联动，当跟车距离低于安全距离时，系统会在零点几秒内启动，以强制拉大跟车距离。

目前，奔驰 S 级轿车、沃尔沃 XC90 等车型均装备有主动防追尾安全系统，在紧急制动时，危险警告灯自动频闪，尽早提醒后面车辆，预防后车追尾。

当前，实际应用中较为困难的是超声波成像系统，以及随后的图像处理部分，它涉及图像处理的小波分析、系统辨识、模式识别和专家系统等多种现代控制技术。整个系统的信号

处理还需模糊控制理论作为基础。防追尾系统的工作环境恶劣，需抗振和抗干扰噪声，这又增加了辅助设备及机构。

11.4 汽车被动安全性设计

在碰撞过程中，车身是生死攸关的部件，即使在柱状碰撞中也起着同样重要的作用。车辆碰撞以后，侧面车框、车门以及车锁系统的变形程度，决定了开启车门拯救被困在损伤车辆内乘客的难易程度。

汽车提供给乘客及其他交通参与者的全部被动安全性，取决于下列因素：

- 汽车部件中与安全性有关部分的性能，不仅包括车身，还有座椅、转向盘、装饰配件等。
- 安全设施的有效性和品质，如安全带、安全气囊、安全带预张紧装置、防滚翻杆等。

如今的乘用车，无骨架式车身（承载式车身）已经取代了梯架式车身（非承载式车身），成为悬架、转向和制动部件的安装基面。车身类型和几何形状确定其纵向刚度、扭转刚度和车辆动态特性。它们建立了前桥和后桥的刚性连接。图 11-11 以宝马 3 系列衍生车型为例，比较了影响纵向刚度与扭转刚度的车身参数。

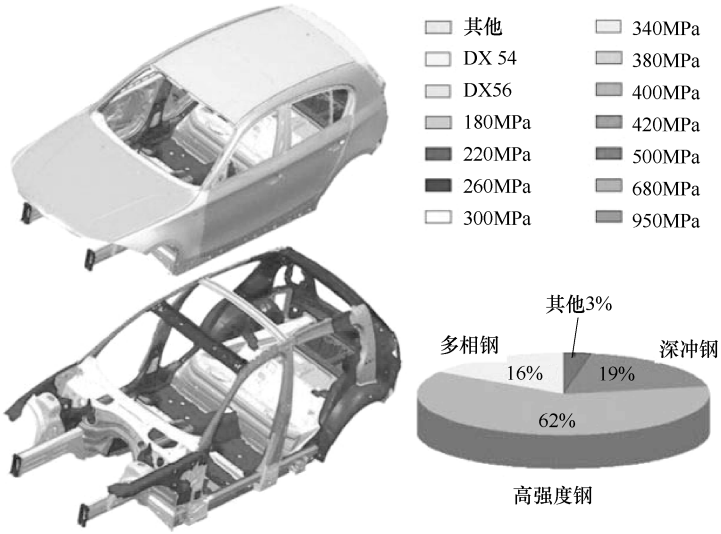


图 11-11 车身钢材等级（来源：宝马）

11.4.1 采用（超）高强度材料

图 11-11 以宝马 3 系为例说明车身用钢情况。由于空间的限制，在侧面碰撞中动能的吸收只能通过侧面车身架和门板的变形，以及通过冲力把汽车推到一旁。在被碰撞的一方，乘客可以通过安全气囊、垫料或衬垫免受损伤。

11.4.2　安全带与安全气囊

1. 安全带

20 世纪 50 年代，萨博和沃尔沃汽车公司就开始配备安全带，当今安全带仍然是汽车上最重要的安全设施。大部分先进的安全设施（如安全气囊等）只能为没有配备三点式安全带的乘客提供有限的安全保护。因此，大多数国家要求新车型所有座位上配备三点式安全带来限制乘客向前移动，并吸收碰撞产生的能量和防止乘客移动或者被汽车抛出窗外。没系安全带仍然是在车祸中受到致命伤的主要原因。后排没系安全带乘客的死亡风险是前排乘客的五倍。

前排三点式安全带上部的设计对身体和座位设计有直接影响。三点式安全带下面两个点通常被固定到座椅上，而上面一个点设计有以下两种固定方式：

- 安装在 B 柱上：减速乘客身体产生的惯性力直接传递到 B 柱上。因为靠背不是负荷转移路径的一部分，所以它可以设计得更简单和舒适。在有些车上，安全带的上部附件依靠沿 B 柱的移动来优化其舒适性，相应地削弱了 B 柱的结构刚性。
- 安装在座位靠背上（在座位上的安全带）：允许一个没有 B 柱的车身结构（如在敞篷车或单排座双人小汽车），使双门汽车的后排乘客进出比较方便，并且，安全带不依赖座椅的位置。这种设计尤其要求后排托架、座椅框架和靠背来补偿由乘客前冲引起的冲力。

为了提高系安全带的佩带舒适性和防止乘客受伤，随着时间的推移，安全带的技术也在提高：

- 紧急制动牵引器（ELR）：允许在汽车行驶时乘客自由移动，但当检测到汽车发生碰撞或翻车时即锁定座位安全带。
- 自动锁紧牵引器（ALR）：提供一个棘齿装置允许手动锁住安全带，使儿童座椅更安全（在美国是强制规定的）。
- 安全带预警器：当检测到汽车将要发生碰撞时，会立即拉紧安全带。通过电子或烟火驱动器，安全带将会拉紧，限制乘客的运动。
- 碰撞力限制器：在碰撞过程中允许安全带在可控方式下，降低安全带作用于乘客的碰撞力峰值。

即使现在大多数国家规定强制系安全带，但是很多驾驶人和乘客仍然不以为意。按照 2006 年的统计，美国前排乘客安全带的使用率为 81%，而 2003 年欧盟国家前排乘客安全带的使用率为 76%。所以，安全带提醒器增加了安全带的使用率，相应地大大减少了总体事故伤害率。

2. 安全气囊

除了安全带，当今汽车安全技术法规强制规定配置安全气囊。安全气囊（SRS）是可膨胀的尼龙袋，在碰撞情况下能缓解人的头部或身体部分与汽车内部组件的撞击。安全气囊可分为四种不同种类：

- 前方气囊：保护前排人员的头部和上身碰撞转向盘或操舵处。
- 侧边气囊或胸部气囊：在侧面碰撞时缓解胸部与躯干。
- 车顶帘式气囊：在侧面撞击中保护乘客的头部和上身。
- 膝部气囊：在正面撞击时保护驾驶人的膝部。

图 11-12 描述了宝马 X3 中前方气囊、侧边气囊、胸部气囊的位置与形状。

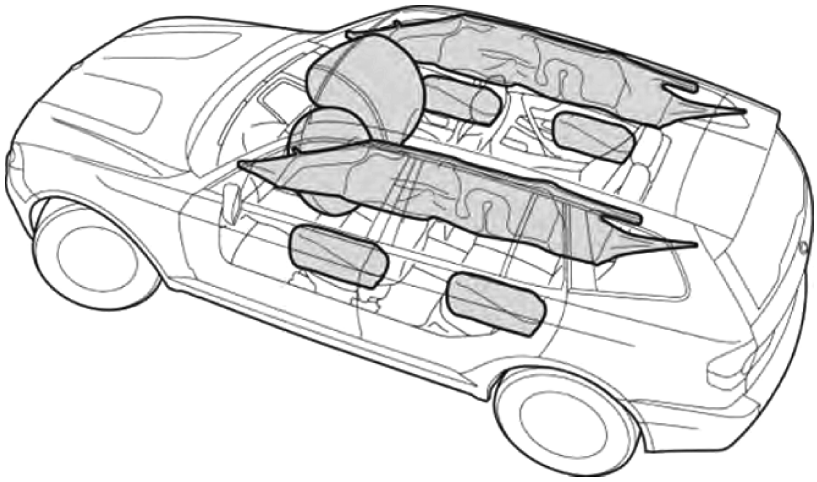


图 11-12　汽车前方与侧面气囊的位置与形状

11.4.3　车身耐撞性设计

1. 保险杠

顾名思义，保险杠对车辆的耐撞性或乘员保护方面的作用不是特别显著，但是能够防止或减轻车辆在前部和后部低速碰撞中前端和后端的物理损坏——这是目前最常见的碰撞类型。

法规要求保险杠能够使汽车结构在前后端的低速碰撞中没有任何损伤。图 11-13 显示了宝马 X5 在正面低速碰撞中前保险杠的变形。安装在汽车发动机舱盖上的移动测量棒表明保险杠实际移动的距离。然而减少保险杠变形程度的目标和给保险杠喷与车身相同颜色的目标冲突，这使保险杠即使在微小的碰撞中也容易显现出来。

图 11-13　正面低速碰撞下，前保险杠在碰撞前、中、后的状态（来源：宝马）

汽车保险杠是汽车的一部分，实际上与其他车在前部或后部碰撞时，保险杆的几何形状和黏弹性对于外部交通参与者来说是至关重要的，如行人、自行车和摩托车。

2. 汽车前舱溃缩性吸能区

毫无疑问，汽车车身的耐撞性是汽车被动安全中最重要的因素。因此，其双重任务是允许预设的结构变形和相关的能量吸收（特别是在正面碰撞或后碰撞时），同时提供刚度来防止或减缓其他车身侵入座舱（特别是在侧面碰撞和翻滚中）。

图 11-14 显示了车身部件在正面变形前后的状态。在正面碰撞中，轻微擦碰时，往往第一变形区中保险杠发生变形。而在低中速碰撞时，第二相容区设置了纵向缓冲吸收元件，这些元件必须按一种可预测的溃缩变形来吸收能量。吸能溃缩区是在汽车的车头和车尾都腾出一个能折叠的区域，这个区域用特别软的、可溃缩的金属来制造，撞车的时候，这个溃缩区折叠而吸收撞击时的能量，最后使得落到人体上的能量减少，确保乘员生存空间。相反，一些没有撞击缓冲区的车，撞车之后虽然车身变形不大，但乘客可能受伤的概率却很高。在高速严重碰撞情况下，依靠车身（第三自身保护区）自身刚度，保护乘客不会受到严重伤害。在低速后部碰撞的情况下，上述说明同样适用于车辆的后部结构。

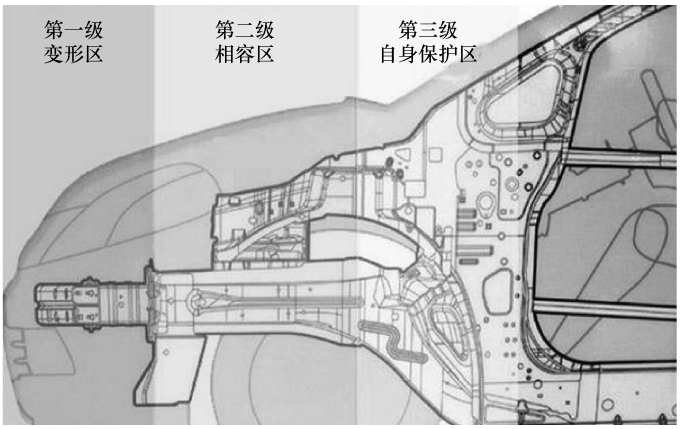


图 11-14　轿车前车身碰撞安全性设计

11.4.4　车门防撞强化设计

为了获得在侧面碰撞或者翻滚中所需要的刚度，车身结构的关键部分如 B 柱或者车门防撞梁由超高强度钢制造。

11.4.5　转向系统与内饰件

为了减轻乘员头部潜在的伤害，安全气囊可防止头部与转向盘、仪表板或侧架触碰——这是以前造成头部严重损伤的典型因素。车内的装饰零件也会与乘员的四肢相触碰，如仪表板下方的衬垫材料与膝盖的触碰。

另一种办法是利用转向柱的回缩功能防止这类伤害，即 20 世纪 80 年代奥迪公司发明的 Procon-ten 系统。Procon-ten 系统用钢缆固定到发动机上，当发生正面碰撞时将转向柱拉回，同时收紧安全带。然而，特别是在高速行驶下，转向盘快速回缩可能给驾驶人带来实质性伤害，这使得在后来的新车开发中停止使用该系统。

11.5 汽车安全性评估与验证

安全性试验项目很多，而且耗资巨大，特别是碰撞安全试验，除正面撞车试验外，近来还增加了侧面撞车试验。可以进行实车撞车试验，也可以进行模拟试验或撞车模拟计算；在撞车试验中需用假人（又称人体模型）进行试验，对人体模型的要求是，其质量、尺寸分布，主要骨骼关节和动作等尽量逼近真人，又要容易测定各部位的加速度、载荷和变形；人体模型价格较高，因此也要求具有高的耐用性。当进行车内装置（如安全带、座椅、转向盘、仪表板等）抗冲撞能力试验时，为节省开支常用撞车模拟装置进行，它以装有人体模型的平台车代替实车，模拟以一定速度运动的汽车撞击固定壁后部件的减速度特性，从而研究冲击能量的吸收情况。

但不少国家规定新车型必须经过实车撞车试验，以验证其撞车安全性。因为车身结构很微小的改变，有时也会显著地改变汽车碰撞后的状态。这需要用高代价的碰撞试验来验证被动安全性，因此必须尽一切努力使车身的设计在系列化开发过程中尽可能稳定。

11.5.1 汽车碰撞模拟仿真

因为所有的碰撞测试都会破坏车辆或部件，所以真实的被动安全测试是相当昂贵的。一辆早期的原型车成本一般超过 100 万欧元。这就是为什么在如今所有的整车特征中，被动安全模拟仿真是最精巧的可选方法之一。在车辆开发项目计划的框架中，仿真测试结果事实上是很精准的，硬件测试只是希望能证实它的结果，而不是再次发现实质性的不同。按照欧洲 NCAP 标准以宝马 X5 进行正面碰撞测试为例，图 11-15 对比了虚拟碰撞和真实碰撞的结果。

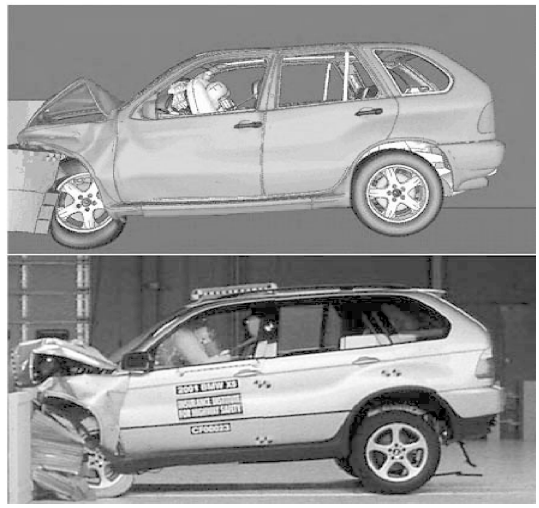
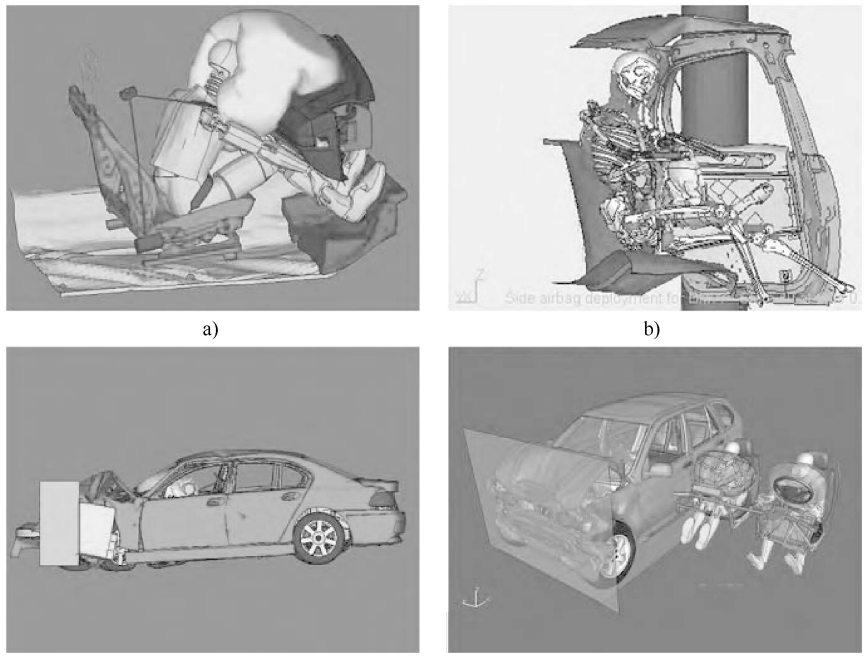


图 11-15 虚拟碰撞与真实碰撞测试对比（来源：宝马）

虚拟车辆碰撞研究后得出的主要结果有：

- 在车辆的几何变形过程中，人们感兴趣的是在车辆的剩余空间（如一个立柱的崩塌）和变形的部件（如转向柱侵入驾驶舱）可能导致的乘客伤害。
- 碰撞过程中，利用虚拟假人（代替真实乘客）获得的减速数据。
- 被动安全设施的有效性，如安全带、安全气囊或者预拉紧安全带。

图 11-16 展示了四种碰撞模拟案例。图 11-16a 中，评估了前排乘客碰撞时的安全性能；图 11-16b 中，评估了一个假人在侧面碰撞中可能遭受的伤害；在图 11-16c 和图 11-16d 中，显示了整车碰撞模拟案例，图 11-16c 表示一例宝马 7 系早期概念的仿真，而图 11-16d 是有关宝马 X5 座椅的详细仿真模拟，通过车内提取的环境数据可改善碰撞相关事件的可视性。



a)　b)

c)　d)

图 11-16　整车和部件碰撞仿真

尽管在某种程度上仿真能代替真实碰撞测试，但是当今的碰撞算法仍有一定的局限性，所以硬件测试还是必不可少的。难以建模仿真的汽车属性包括：

- 非塑性材料的特性（如玻璃、纤维增强塑料）。
- 几何公差。
- 燃油系统的密封性。
- 车门的密闭性。

11.5.2　假人碰撞试验

为了确认从模拟仿真车辆碰撞中得出的结果与真实情况相似，对每组原型车均要进行碰撞测试。如果真实的测试显示出了与仿真不同的特征，那么额外的开发循环将会导致开发计划的延误和追加资金的损失。为了能够尽快地对这种情况做出反应，通常每一组新原型车均要选择一辆用于碰撞试验。

在新车开发项目的结尾，通过对预量产化车辆进行碰撞试验，证明其符合所有强制性与非强制性要求，这不仅包括投产后销售给消费者的新车，而且对系列化生产的产品，也要求达到同样的性能要求。

1. 假人种类

可想而知，所有满足客户需求的被动安全都不可能用真人来做测试。在标准化碰撞过程中，根据拟人化测试设备（ATD）要求，一个仿真假人拥有真实的外形和重量，并安装了各种传感器，根据碰撞过程中假人身体感受到的碰撞力、加速度和假人身体不同部位的变形，获得有关损伤程度的客观数据。图 11-17 展现了混合Ⅲ型假人的传感器。

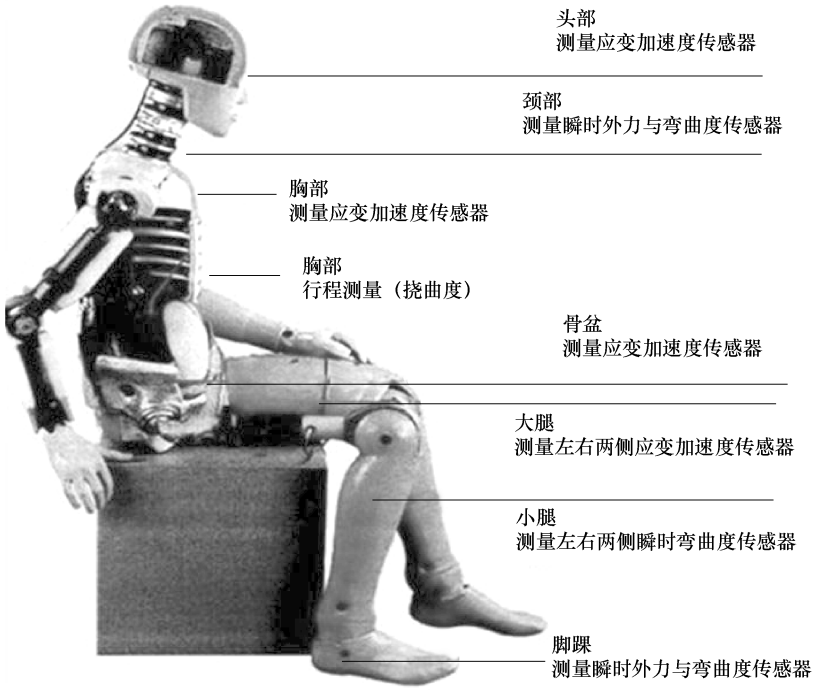


图 11-17　混合Ⅲ型碰撞测试假人的传感器

根据每种碰撞类型的普遍受伤情况，不同的假人模型安装不同的测试设备用于正面碰撞、侧面碰撞和滚翻测试。为了得出可对比的结果，每一次特定的碰撞试验包括假人模型都是按照标准的技术要求进行的。目前，流行的假人模型类型主要有：

- 用于正面碰撞的混合Ⅲ型。
- 侧面碰撞的侧面人体模型（SID）。
- 后部碰撞的后方人体模型（BioRID）。

碰撞法规伤害标准：

正面碰撞测试中，中国使用的是 2 个 Hybrid Ⅲ（正面碰撞假人）第 50 百分位男性；美国使用 1 个 Hybrid Ⅲ（正面碰撞假人）第 50 百分位男性。

侧面碰撞试验中，美国、欧洲所用的侧碰撞假人为 SID 假人，中国用的是 EUROSID-假人。

车辆碰撞中的受伤情况很大程度上取决于乘客的体积和质量。碰撞假人模型必须适用于所有人群。因此，美国联邦法规（CFR）第 49 条 572 款展现了一个完整混合Ⅲ型家庭型号的假人模型（表 11-4 和图 11-18）。

混合Ⅲ型假人组的未来继承者是先进的碰撞假人——雷神（THOR），在以往的假人技术基础上，它增加了更多的功能：

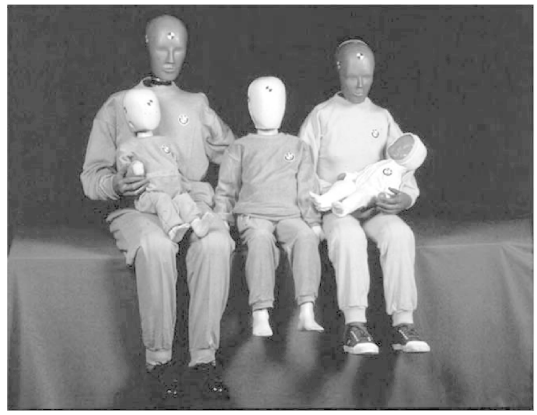


图 11-18　混合Ⅲ型家族（来源：宝马）

- 辅助优化“智能”乘员约束系统，包括设置气囊调度阈值和整体式先进安全带/安全气囊约束系统的设计。
- 改进了安全带/安全气囊的交互作用的评估。
- 采用脊椎和颈部新设计，从而改进头部运动特性。
- 改进颈部损伤评估，包括错位损伤评估。
- 增加脊柱的柔性，实现更真实的脊椎运动特性。
- 坐姿对约束性能影响的评估设施。
- 探测安全气囊、安全带、轮辐与腹部的交互作用。
- 髋关节损伤评估装置。
- 可详细评估足部运动与踝/足部/胫骨的潜在损伤。
- 局部面部损伤评估装置。

其他假人模型的类型——虽然不属于任何强制性的测试，但是可以用于深入研究相关的损伤过程。例如，包括儿童约束安全气囊交互作用（CRABI）组代表了 6 个月、12 个月和 18 个月阶段的婴儿，或者还有代表孕妇的假人模型。

表 11-4　混合Ⅲ型碰撞测试假人组的技术规格（来源：CFR）

类　　型	身高/cm	体重/kg	座 位 位 置
50% 男性①	175	78	驾驶座
95% 男性	188	100	前排乘客座
5% 女性	152	50	前排，驾驶座
十岁儿童		35	后排
六岁儿童		21	后排
三岁儿童		15	后排

① 以上数值表明了体形或者重量较轻或相同的同一性别的人比例（美国）。中国男性平均身高为 170cm，体重 64. 1kg；女性平均身高为 158cm，体重 50. 3kg（以上数据取自成年人）。

2. 测试过程

尤其当要证明车辆符合法律要求时，必须严格按照规定的程序进行碰撞测试，具体包括以下详细的技术规范：

- 障碍物（如几何形状、材料、结构、安装等）。
- 测试设置（如车辆与障碍物的相对运动、碰撞的位置、碰撞时的车速等）。
- 测试车辆准备（如载荷和载荷分布、座位的设置/位置、扶手、驻车制动杆、齿轮、灌装的液体等）。
- 碰撞前后车身被侵入量的测试。
- 假人模型的规格和准备，如假人类型、衣服/鞋、放置等。
- 测试装置的准备和使用。
- 测试拍摄（如数量、类型和高速摄影机位置）。
- 损伤参数和总体损伤等级的评级。

作为测试前期准备的一部分，假人碰撞测试模型的测量仪器必须要做校正与校核，以确保它的正常功能。下一步，目标标记将贴在头的一侧，以便接下来的分析。此后，模型被放置在测试车上，检查和分配数据通道（混合Ⅲ型假人组多达 44 通道）。在假人手臂、膝盖

和头上涂抹不同的颜色标记，以便在碰撞后的车辆上识别各自的接触点。

在真车碰撞测试中，车辆被一根缆绳牵引以一个指定的速度撞向障碍物，在即将撞到时，缆绳被解开使之脱离车辆。碰撞阶段总共持续 100 ~ 150ms。图 11-19 显示了四个主要的不同类型的碰撞测试：宝马 3 系偏置变形障碍的正面撞击测试、宝马 X5 的侧面碰撞测试、MINI Cooper S 车型的侧面柱状碰撞测试和宝马 3 系的侧翻测试。

图 11-19　真实碰撞试验：正面碰撞、侧面碰撞、侧面柱状碰撞与侧翻（来源：宝马）

3. 结果分析

测试结果文本将被两个层面实施：影像和数据资料的记录。多达 20 台高速摄影机从不同角度拍摄碰撞的场景，以每秒钟 1000 张图片的速度详细记录整个车辆和乘客的变形与运动过程。同时，假人模型体内的仪器记录了受伤数据并且存储在一个位于人体模型胸部或者车辆行李箱的临时存储库里。通常，每个人体模型会记录 30000 ~ 35000 个数据项。此外，一些三轴加速度传感器被固定在车身上，用来传输有关加速度的数据。

11.5.3　主动安全性评价

目前全球影响力较大且已开始系统性地对汽车主动安全进行评分的两家汽车安全评测机构是 Euro NCAP 和 IIHS ，国内的 C-NCAP 一直跟随 Euro NCAP 的步伐。

Euro NCAP 自 2009 年以来就将乘用车的评分分为四大项（图 11-20）：

- 成人乘客。
- 儿童乘客。
- 行人。

图 11-20　主动安全测试 Euro NCAP 系统

- 安全辅助。

每项以百分比的形式展示成绩，最后再以星级对车辆进行综合评价。每年 Euro NCAP 都会对具体评估评分进行微调。2017 年除了加入了不可变形正面 100% 碰撞（从美国 NHTSA 借鉴的）之外，更多的是对于安全辅助内容的评估。

当前安全辅助的 5 项评估内容包括：

1）电子稳定控制系统（ESC）。2014 年开始欧洲已经强制其作为所有新车标配（图 11-21）。另外先进的主动安全配置还包括电控行驶稳定系统（ESP）、车身动态稳定系统（DTC）、车身稳定控制系统（VSC）等。

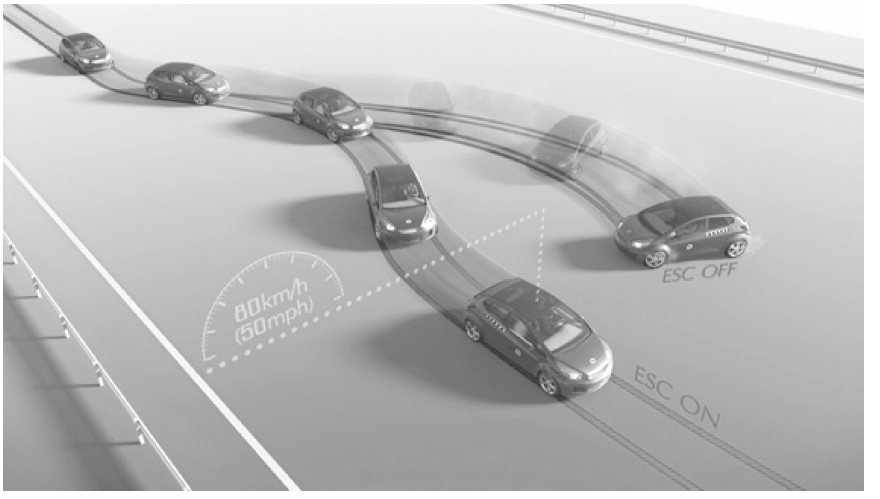


图 11-21　电子稳定控制系统（ESC）

2）安全带提醒。在 C-NCAP 是作为加分项的。

3）车速辅助。

- 自动识别路牌并将限速显示在仪表板/屏 上（欧美多款车型都可以选配）。
- 能够告知驾驶人超速。
- 主动预防车辆超过设定速度。

4）城市自动制动（AEB Interurban）。如沃尔沃的 City Safety、奔驰的 Collision Prevention Plus，国内沃尔沃和奔驰很多车型都标配这两项。具体测试内容：

- 以 30～80km/h 速度驶向一辆静止的车辆。
- 以 30～80km/h 速度驶近前方的车辆。
- 前方 50km/h 行驶车辆突然（慢慢、急速）制动。

5）车道支持（Lane Support）。这个项目只要有提醒 Euro NCAP 就给分，不过驾驶人已经做到可以主动干预，让车辆自动并回到车道里。

汽车安全评测机构（IHS）的测试内容并没有这么全面，只有“AEB Interurban（城市自动制动）”部分，并且评分系统不一样。这些功能只有后三者是新的，而且多数车辆没有配备。

11.5.4 事故损伤医学鉴定

被动安全性的量化评定方法需要客观评估和比较乘客伤势严重程度。在全球汽车公司的范围内，美国汽车事故医学评定组织（AAAM）颁布的简明损伤定级标准（AIS）逐渐成为被动安全性量化的评定标准。根据 AIS98，通过受伤位置和严重程度进行分类。通过 6 位数结构定位（AIS98-ID）表明人体的各个部位。表 11-5 显示了损伤定级标准 AIS98-ID 的第一级别（第一位数）。

表 11-5 根据 AIS98 的受伤位置（来源：AAAM）

AIS98-ID（第一级）	身 体 部 位	AIS98-ID 号码
1	头部	236
2	脸部	87
3	颈部	80
4	胸部	175
5	腹部	233
6	脊柱	208
7	上肢	125
8	下肢	164
9	外部及其他创伤	33

由于中外人体的体型不同，事故中人体受伤害部位也有所不同，美国认为侧面碰撞对人体伤害最重的是胸部，其次是腰部，因而采用了胸部伤害指标和腰部伤害指标。对于胸部伤害指标 TTI，是通过肋骨和脊椎加速度值计算出来的，而腰部伤害指标是通过臀部加速度值计算出来的。中国的侧碰撞法规试验方法草案中，通过交通事故分析，认为对乘员头部、胸部、腹部以及腰部的伤害较为重要。因而在乘员伤害评定指标中，采用了头部 HPC、胸部变形量及变形率、腹部载荷及腰部载荷这几项指标。

受伤程度通过 1 位数 AIS 编码量化（表 11-6）。安全性需求通常由 AIS 评价指标的最大值 MAIS 评价评定。

表 11-6　根据 AIS98 受伤程度评估（来源：AAAM）

AIS98 编码	受 伤 程 度
1	轻微
2	一般
3	严重
4	非常严重
5	危险
6	极限
9	更进一步说明

对损伤定级标准的强化是事故伤害成本定级（ICS），它允许全面评估事故伤害相关的总成本。为实施某项交通安全法律措施，基于政府成本/收益分析来计算潜在的社会效益。

第12章

汽车防盗性设计

12.1 相关法规与设计要求

12.1.1 汽车防盗性分类

虽然目前大多数的汽车保险包含了盗窃理赔并最终能赔偿购买者由于被盗窃引起的相关经济损失，但是汽车被盗恐怕仍然是车主最头疼的问题了。然而作为汽车的重要性能之一，汽车防盗性却只得到小部分汽车购买者和开发人员的关注。消费者与销售人员交流的几乎都是汽车的操控性、行驶平顺性、安全性等方面，而在意汽车防盗性的消费者为极少数。同样地，汽车研发团队花费大部分人力致力于满足汽车整车性能目标，却很少安排成员去负责汽车防盗性目标功能。

在本书中所指的汽车盗窃主要包括以下三个不同方面：

- 整车盗窃。
- 汽车配件盗窃。
- 车内财物盗窃。

对于这三种类型的盗窃，以下四项主要参数决定了汽车盗窃发生的可能性：

- 汽车本身的吸引力、整车价值、配件价值和车内财物价值。
- 汽车本身的防盗技术水平。
- 汽车盗窃者的技术水平。
- 汽车停放的区域与地点。

汽车防盗性的最后一项影响因素取决于当地的社会富裕程度和防盗设施等社会因素，而前三项影响因素只取决于汽车设计本身。一般情况下，盗窃者的盗窃动机强烈与否和盗窃所得利益成正比，与被捕后面临处罚的严厉程度成反比。因此，汽车防盗设计的两个主要策略也是很清晰的：

- 使汽车和汽车配件尽可能地不吸引小偷的注意力。
- 使盗窃汽车变得尽可能困难并具有相当的风险。

但是实现这两个主要策略会出现以下相悖的问题：

- 对顾客具有吸引力的汽车，同时也意味着对窃贼有吸引力。
- 易于车主进入车内的设计，也方便了窃贼进入车内进行非法盗窃。
- 紧急情况下便于救援人员进入车内的设计，也方便了窃贼进入车内行窃。
- 易于车主操作，也意味着易于窃贼操作。
- 易于车主配丢失的车钥匙，也意味着车钥匙易于被偷配。

- 盗窃中自动启动的防盗系统，正常使用情况下可能出错致使汽车无法起动。

1. 整车盗窃

由于电子发动机防盗器等防盗设施的配置，全球范围内的汽车盗窃率有所下降。例如，自 1998 年起德国开始强制安装电子发动机防盗器，德国保险协会在 1993 ~ 2006 年间的调查结果显示，汽车盗窃率下降了 80%。同样的情况也发生在了英国和澳大利亚，在这两个国家防盗器是法律规定要求安装的。在可以轻松获得此类设备但非强制性安装此类安全设备的美国，汽车盗窃率在 1995 ~ 2006 年间也下降了 19%。

汽车被窃的四个主要原因有：

- 为了驾驶作乐，之后丢弃被盗汽车。
- 用于犯罪用途，之后丢弃被盗汽车。
- 供窃贼长期驾驶。
- 出售整车或配件。

从澳大利亚官方统计数据看，75% 的盗窃者行窃是出于前两个原因。将盗窃汽车供自己使用需要伪造一系列的官方文件，流程烦琐，所以较少出现。因此，在所盗取汽车所在的国家销赃有一定难度。因此，用于销赃的汽车一般会被运往不需要注册即可销售的国家进行出售。通常，整车盗窃一般由一定规模的犯罪组织实施并进行跨国销赃。

为了采用适当的技术预防措施，设计者须对整个汽车盗窃过程进行详细分析。在这里，一个决定性的因素是，潜在的小偷是否拥有车钥匙，能将汽车打开并且发动。如果不是，有两种可能的方法偷取一辆汽车：

- 通过外力强制进入汽车，解除转向锁，通过短路点火起动发动机。
- 将汽车拖走。

不过目前发生的大多数盗窃案件是盗窃者拥有汽车的钥匙。典型的窃取车钥匙的方法有：

- 通过有访问钥匙权利的人在未经车主同意的情况下拆除钥匙。
- 窃取驾驶人无意留下的车钥匙。
- 偷取或偷配车钥匙。
- 劫取插有钥匙的汽车（劫车）。

一种完全不同的窃车方式为欺诈，窃贼以虚假转账骗取售车者信任，实际上并不支付费用就诈取汽车。

2. 汽车配件盗窃

得益于先进的防盗技术的广泛应用，整车盗窃已变得十分困难。在此情形下，如何防止窃贼盗取车内财物和汽车配件对于设计者而言变得更加重要。对于盗窃车内财物和汽车配件这两种盗窃行为，设计者分别采用了恰当的方式去提升汽车防盗性。

昂贵汽车配件的盗窃者往往来自于某些犯罪组织，他们利用专业知识，使用专业工具盗取他们需要的某些汽车配件。盗窃清单包括安全气囊、氙气前照灯、导航系统、汽车音响和一些可以从中得到铂、钯等贵重稀有金属的汽车配件。对他们而言，隐蔽作案，避开公众注意比充足的盗窃时间更为重要。

3. 车内财物盗窃

盗窃车内财物通常是非专业的窃贼所为。这类窃贼往往急需用钱，希望所偷物件尽快变

现。他们从车内窃取一切能尽快脱手的私人财物（如手机、相机、独立导航器等），并且通常会使用打破车窗或打开车顶等方法尽快得手后离开。

12.1.2 汽车防盗性的法律法规

法律规定所有汽车市场应当提供一定水平的汽车防盗性的安全措施以保障汽车的防盗性能。汽车保险公司更是背负着与汽车防盗性相关的最大经济压力，德国保险协会（GDV）、英国机动车辆保险维修研究中心（MIRRC）、美国保险协会（AIA）等保险机构是汽车防盗性评定标准的推动力量。

在世界范围内，主要有两种不同的汽车防盗性评定标准：FMVSS/CMVSS（美国联邦机动车安全标准）114 和 ECE R（欧盟防盗标准）116。

1. FMVSS/CMVSS 114

这是美国和加拿大的汽车生产商遵循的汽车防盗性评定标准。FMVSS/CMVSS 114 包含的防盗标准有：

- 无论何时当汽车处于钥匙拔出的状态时，锁止系统必须防止发动机处于正常激活的状态，防止汽车转向或自移动。
- 每当车门打开且车锁中插有钥匙时，系统必须提醒驾驶人注意拔下车钥匙。

适用于确保自动变速汽车安全运行的要求有：

- 只有当汽车处于停车档位时，驾驶人才能拔下车钥匙。
- 处于停车档时，车辆不能移动超过 150mm 级的 10%。
- 处于停车档时，汽车转向与自移动处于锁止状态。

2. ECE R 116

ECE R 116 是按照欧洲经济委员会（UNECE）形式批准进行汽车防盗性设施强制评定。除了美国和加拿大，ECE R 116 评定体系几乎被用于所有其他国家。其防盗准则要求包括：

- 这些设备需满足防止非车主的其他起动发动机（如点火锁），防止非车主人转向和依靠自身动力的行驶或移动（如转向锁、传动锁、互锁装置）。这些设备所需的技术规范（如最低数量的组合键、锁止技术、对外力的抵抗等）都包含在 ECE R 116 的第一部分。
- 发动机电子防盗器，利用自身的动力禁用至少一个车辆电路（如起动机、点火装置、燃料供给系统、气动分离弹簧制动器等）。如果车辆配备的是柴油发动机或防盗系统是在购买后安装的，则至少有两个独立的汽车电路必须被禁用。这些技术规范（如用于设置和复位的编码技术、操作的可靠性和安全性、部件更换等）都包含在 ECE R 116 的第三部分。

虽然安装报警系统不在 ECE R 116 的要求范围内，但它指定了这些系统和车辆配备的技术要求（如入侵程度的检测、驾驶舱监测技术、声光报警信号的持续时间和强度、防误报安全性等）。这些规范都包含在 ECE R 116 的第二部分。

12.1.3 新车防盗安全性评级

虽然 FMVSS/CMVSS 114 和 ECE R 116 细化了某些汽车防盗性功能，但新车安全性评级（NVSR）的程序是由英国机动车辆保险维修研究中心（MIRRC，常称作 Thatcham）制定的，能对汽车防盗性进行客观的量化评级，类似于 NCAP（New Car Assessment Program）的汽车被动安全性评定。防盗性评估主要由以下三个方面组成：

- 防止强行进入。
- 防止开车离开。
- 部件识别与替换。

用于评定测试车辆标准的总分为 1000 分，被分配在以下各个评定类别项目中：

- 强行进入车辆座舱（最多 175 分）。通过标准盗窃方式进行测试。必须保证被测试车辆座舱、发动机舱和行李箱在 2min 内不被外力侵入，轮胎必须安全固定。
- 点火锁或转向柱锁（最多 90 分）。通过盗窃者常用的盗窃方法测试。受测试车辆须经受住 2min 的撬锁时间（除了进入车舱所需的时间）。
- 汽车和零配件识别（最多 115 分）。评定车辆配件是否具有清晰可识的汽车识别号，这些识别号是否容易被仿制。
- 综合电子防盗器的可靠性（最多 400 分）。
- 综合报警器的可靠性（最多 200 分）。
- 车钥匙安全性与配件更换性（最多 20 分）。

各部分评价得分相加后，总分会转化为最高为五星的不同星级（与 NCAP 星级评定类似），五星表示车辆拥有非常优秀的防盗技术。

12.2　汽车防盗系统设计

基于前面讨论的几种盗窃类型，图 12-1 中列举了一系列详细的盗窃流程与种类。通过仔细研究盗窃流程，汽车防盗设计人员能进一步制定出更为有效的防盗措施。

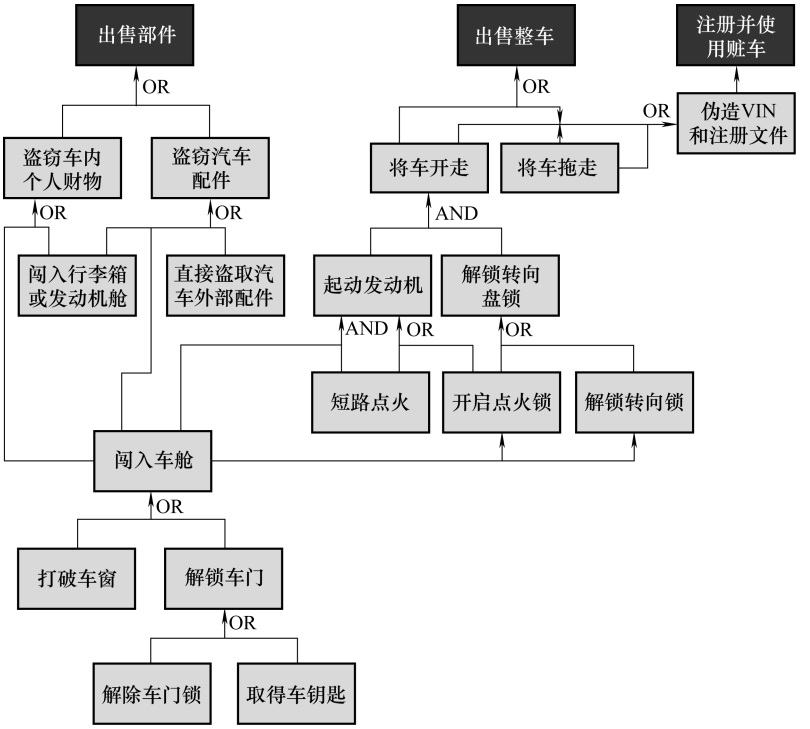


图 12-1　汽车盗窃流程图

从图 12-1 描述的盗窃流程中可以得到以下六种不同的防盗策略：

- 防止未经授权的车辆移动。
- 防止未经授权进入汽车内舱、行李箱、发动机舱。
- 防止未经授权的驾驶。
- 减少车内个人物品的价值与可使用性。
- 降低总体被盗风险。

12.2.1 防止非法移动车辆

把车辆拖走或将车辆装载至平板车中都需要一定的设备，但如果环境合适，这种方式能快速、隐蔽地将汽车盗走。装有传感器的车辆能在这种情况下检测出车辆非常规的移动，并且能发出警报或通过发送无线信号通知车辆所有者。

然而最有效的防盗措施是直接阻止车辆的移动。自行车和摩托车一般会被锁在固定的物件上以达到防盗的效果，但是该方法并不适用于汽车，除非将汽车停靠在有专门防盗设备的地点（防盗系统需要进行独立的设计）。除了技术上难以提供支持，该方案在一定程度上触犯了法律。因为车主要保证停放着的车辆在紧急情况能被随时移动，以让急救车辆通过。

12.2.2 防止入车偷窃

如果窃贼的目标并不是能在外部窃取的汽车配件（如车轮），则任何偷盗者做的第一件事就是进入汽车内部或发动机舱。如前所述，有两种不同的动机和方法使非授权者进入汽车内部。

1）如果盗窃的目的是自己使用或转售所盗汽车，那么盗窃过程如果对汽车造成损坏将减少汽车的价值，所以偷盗者会尽量减少对汽车的损坏。

2）如果盗窃目的是拆卸车辆配件或盗取车内财物，那么破坏车辆对于窃贼而言就相对不重要。唯一重要的就是如何尽快得手，这种情况下，相比于前者而言，盗取车内财物的盗窃行为对车辆的破坏程度会更严重。

表 12-1 列举了防止未经授权进入车舱的技术。

表 12-1 禁止未经授权进入车舱的系统

系　统	安全措施
车锁系统（车门、发动机盖、行李箱）	• 气缸锁定机构可防止机械操作（如从车身外钻孔） • 防止远程控制信号被克隆使用 • 锁紧系统可防止电子操作（如进入相关的车辆总线） • 如果车辆处于锁止状态下，车辆不能从内部打开车门、发动机盖或行李箱盖
车窗和车顶	• 安装硬化玻璃 • 防止利用电子设备打开车窗或车顶
软顶部位	• 采用防割破的结构和纤维 • 防止利用电子设备开闭软顶
报警系统	• 检测机械篡改锁紧系统 • 检测入侵车内 • 检测车舱内的动作

12.2.3　防止非法驾驶车辆

对于经验丰富的汽车窃贼而言，打开转向柱锁并不是一件难事，所以很长一段时间以来都通过额外加装转向轮锁来防止汽车被盗。特别是对于停放在汽车盗窃高发区的汽车，车主还会购买大量铁质锁锁住转向轮，以此防盗。该方法最大的劣势在于锁具需要手动装卸，非常不方便。但是就像安全带不能万无一失地保护乘客与驾驶人的生命一样，这种车辆防盗措施也并非绝对安全。

在这样的背景下，前述电子发动机锁在不知不觉中获得广泛应用。发动机锁最大的成功之处在于其能中断至少三个发动机电路，通常是起动系统、点火系统、燃油供给系统。只有当专门的密匙放在起动开关上时，这些关键的电路才能闭合。因此，只有使用原有的密匙才能驾驶车辆。

12.2.4　降低被盗件使用价值

除了以上讨论的从汽车本身直接防止汽车被盗的措施，降低可能被盗配件的价值及可使用度能有效地降低汽车被盗的可能性。汽车及其配件可以配备的一些产品特征使得在其非法使用或转售过程中，使偷盗者需要付出很大的努力，且会带来较高的风险。

汽车识别码（VIN）是用于汽车上的一组独一无二的号码，可以识别汽车的生产商、发动机、底盘序号及其他性能参数等资料。该号码能帮助人们找出车辆的合法拥有者。为了防止车辆识别号被窃用，一般将其置于汽车前方风窗玻璃下方，从而使得窃贼需要拆除和破坏前方风窗玻璃才能获得该识别号（图 12-2）。另外，标注有永久 VIN 的部件（风窗玻璃）需要很费力气才能更换。同时，这些号码只有在如紫外线照射等条件下才能被读取。这些貌似不起眼的汽车识别号仿制非常困难，使得盗取的车辆没有转售价值。然而，要达到其设计的意义就得使潜在的窃贼能够意识到这一清晰可见的安全标识。

图 12-2　在车窗上用于防盗的汽车识别码（来源：Securmark）

类似地，价格昂贵的车辆部件（如轮辋）可打印 VIN，使其具有可跟踪性以防止盗窃。

车辆追踪系统是一种能快速有效地定位被盗汽车的防盗系统，并且能使被盗车辆快速回到其车主手中，同时也被称作车辆盗后恢复系统（After Theft Systems for Vehicle Recovery，ATSVR），该系统能自动识别被盗车辆，并将位置信息发送到公安机关（或汽车信息安全中心）。

车辆盗后锁定系统是一种加强的车辆盗后恢复系统（ATSVR），它能通过以下两种不同的情形帮助追回被盗的汽车：

- 授权人员可以通过控制使在行驶的被盗汽车减速直至停车。
- 防止被盗汽车的发动机在停止后被再次起动。

这些系统的主要好处与其说是能提高找回被盗汽车的可能性，倒不如说它能在第一时间降低汽车被盗的可能性，因为这些系统能对潜在的窃贼起到一定的震慑作用。

12.2.5 降低汽车被盗风险

与不断改善的防盗系统一样，汽车驾驶人本身也是汽车防盗的一个关键性因素。如果他们能认真听从警方、政府或保险公司提供的安全性建议，则汽车相关的盗窃概率能进一步减小。但是因为其在某方面的疏忽或无知，很多车主忘记照看好自己的车辆，如忘记关闭车窗，或将车辆停放在一些未知的区域，或参与一些其他不安全的活动。

如今许多产品的特点可以有效或者至少部分地弥补这些人性的弱点，如声音警报器，如果车锁了但车窗没有正常关上，或停着的敞篷车感受到任何侵犯驾驶舱的行为，或者驾驶人停车后打开车门时钥匙仍插在点火开关里，这些情况下声音警报器都会起到报警提示的作用。

正如上面谈到的一样，汽车被盗的一个主要风险因素就是汽车前往或停放的地点。在这点上，汽车导航系统可以提供一些有用的信息。一个来自本田汽车公司的概念就是将停放地点的盗窃或故意破坏的概率提供给驾驶人，并提供驾驶人可以避免风险的停车区域。

12.3 汽车防盗系统测试与评估

因为汽车盗窃通常发生得很隐蔽，所以要了解盗窃行为是如何具体操作的就显得比较困难，特别是对于盗窃成功的案例。因此，直接评价一辆汽车的设计及其设备的防盗性能是不可能的。

Thatcham 实验室合理假设了一系列详细的偷车所尝试的物理攻击测试。基于新车安全性评级（NVSR），制定了一系列可用于定量评估的相关标准程序，从而可以比较不同汽车的防盗性。图 12-3 展示了在 Thatcham 实验室执行的物理攻击实验。

图 12-3 Thatcham 实验室的物理攻击测试（来源：Thatcham）

第13章

车载信息娱乐系统设计

车载娱乐信息系统（In-Vehicle Infotainment，IVI）作为汽车内的部件组成，与传统意义的软件系统不同，它是车辆设备的一部分，提供辅助驾驶、多媒体播放、互联网服务、通信服务等功能。随着车载娱乐信息系统技术的发展，它给我们的驾车生活带来方便的同时也提高了趣味性。同时随着人们对驾车的安全性、舒适性等要求的不断提高，车载系统也会不断地发展，具有集成娱乐功能的车载信息系统的汽车在人们日常驾车活动中已经超越了代步工具这一概念的局限，同时也从原有的个体服务发展成为能够与网络进行通信的车载移动服务终端。

13.1 概述

13.1.1 系统功能与客户需求

电子技术自20世纪50年代开始运用于汽车以来，在汽车上的应用范围越来越广，特别是集成电路技术的发展，为汽车提供了各种各样功能强、速度快、可靠性高的电子控制系统。电子控制系统的使用改善了汽车很多方面的性能。现代的汽车拥有数量繁多的电子控制单元，它们之间如何有效地进行数据的访问与共享，采用何种车载网络等都是汽车制造商思考的问题。车载网络已经成为汽车电子系统中的一个重要的子系统。行业的发展和用户需求的不断增长，促使车载网络技术不断发展。因此，车载网络技术也是当下汽车电子技术的一个热门话题。

信息系统（Information System，IS），是指由计算机软硬件、网络、数据信息等组成的系统，能够对信息进行收集、传递、存储、加工和维护等操作处理，它主要是处理信息流的人机一体化系统。

在汽车工程学上，车载信息娱乐系统归纳为用来满足驾驶人和乘客对信息、交流、娱乐方面需求的电子电器系统。整车性能如操控性、被动安全性由电子器件支持，而信息娱乐系统则是汽车电子器件直接与顾客相关的领域。信息娱乐系统包括导航系统、报警系统和传递信息、娱乐的许多电子通信设备及服务（例如，电子邮件、网络连接和当地的基本信息如加油站、餐馆、交通和天气等）。自动辅助驾驶系统包括碰撞警报、自适应巡航控制系统、车道偏离警告、变道辅助和停车辅助系统等。随着这些功能之间的联系变得更加紧密，信息娱乐系统和自动驾驶辅助系统之间的区别正在日益模糊。

显然，对顾客来说最重要的问题是上述这些功能中哪些是他（她）的汽车所能提供的。除了功能，性能或速度是至关重要的，如对于导航系统来说，当驾驶人准备出发却必须等待导航系统进行路线选择时，路线计算的时间是很重要的。在当一辆车行驶在异国土地上时，收音

机、导航、电话、交通信息等必须有效，当然操作语言也应该是可选定的。

作为一种物理装置，驾驶人和乘客通过这种装置操作和设置信息娱乐系统及其他电子系统，人机界面的设计与客户高度相关，经常是影响购买的决定性因素。在同级别市场竞争中汽车技术上的差异正在稳定缩小的时候，人机界面是一个新的竞争领域，现今不同的制造商正在以不同的方式满足客户的需求。主要的特征体现在功能运作的方式或输入数据的方式以及如何从系统得到反馈。

另一个客户的需求是个人消费类电子设备（CE）的集成，例如，手机或掌上电脑（PDA）具有无缝集成功能，意味着客户可以使用个人设备（通常是与汽车无关的独立产品）连接人机界面然后直接访问存储的数据，像电话号码、地址，用于打电话和导航。

有关信息娱乐系统的法律规定主要集中在尽量减少驾驶人由于使用这些系统所引起的分心上。报告指出因驾驶时使用手机而造成的损伤与酒后驾车一样严重，大部分国家禁止驾驶时拿着手机通话，这间接要求需要能将手机和人机界面连为一体的技术手段。另一个使驾驶人分心的重要方面是显示器和控制器的位置。作为一个经验法则，控制器不能盲目操作，显示器不应该被放置在视角下方超过 30°的位置。

汽车通常每 7 年重新设计一次，手机平均六个月后就会被它的下代产品代替。因此，将个人消费类电子产品（CE）设备集成到车辆是一个巨大的挑战，它要求把汽车设计成可与未来 5 ~6 年上市的手机连接使用。一位刚刚购买了五万美元新车的顾客基本不可能接受在这辆车上只能使用接近 10 代以前的手机。

德国汽车工业协会下的一个工作组（CE4A）定义移动设备与汽车电器/电子（E/E）系统之间的标准接口。CE4A 由 8 个专家小组组成，分别从事不同的专业领域：电话、媒体、个人信息管理器、导航、终端模式、标准连接器、法律形式、展示平台。例如，电话专家小组的一个任务就是要求蓝牙标准与汽车行业相适应。

将来，通过无线宽带上网与汽车外界进行数据交换的可能性将会使用离线计算能力（如导航路径规划）和离线数据连接（如储存在家庭计算机里的音乐），这将信息娱乐系统功能拓展至一个新的层面，见表 13-1。

表 13-1　信息娱乐系统的集成层次

开放接口	MP3 播放器 手机 掌上电脑	带有个人数据的个人设备（通常独立购买）预期可以通过车辆的人机界面操作
集成化	收音机 CD/DVD 播放器 导航器	高端市场的顾客希望有集成方案。集成使得系统变得专有并能防盗。在低端的市场，售后产品通常可添加到出厂后的汽车上
中控化	交通信息（TMC） 地址簿 音乐/视频点播	数据由与车辆通过无线宽带连接的外部服务器和软件服务商提供与处理

13. 1. 2　当前研究与发展现状

1. 车载网络

当前，各种新的、不同的车载网络协议不断产生，并应用在汽车电子系统，以满足汽车

市场的客户需求。20 世纪 80 年代各大汽车制造商和零部件供应商就开始车载网络技术的研究，当时丰田公司第一次在汽车上使用车门控制系统实现多个节点的连接通信。最初的车载网络中，各汽车制造商并不认可和使用统一的车载网络标准，它们都有自己的网络总线标准体系，供应商都必须按照其标准来开发零部件，显然这样的零部件不一定能用于其他品牌的汽车上，汽车制造商也就无法选择自己认可的供应商的产品，这显然不利于汽车工业的发展。目前各类车载网络标准已有 40 余种，如 CAN、LIN、F1ex Ray、Byte-Flight 和 TTP 等，见表 13-2。

表 13-2　主要车载网络标准一览

车载网络名称	性 能 概 要	通 信 速 度	开发公司或组织
CAN（Controller Area Network）	车身/动力传动系统控制用局域网协议，最可能成为世界标准的车用局域网协议	1Mbit/s	Robert Bosch，ISO
VAN（Vehicle Area Network）	车身系统控制用 LAN 协议，以法国为中心	1Mbit/s	ISO
J1850	车身系统控制用 LAN 协议，以美国为中心	10.4～41.6kbit/s	Ford Motor
LIN（Local Interconnect Network）	车身系统控制用局域网协议，液压组件专用	250kbit/s	LIN
IDB-C（ITS Data Bus on CAN）	以 CAN 为基础的控制用局域网协议	250kbit/s	IDM
TTP/C（Time Triggered Protocol by CAN）	重视安全，按用途分类的控制用局域网协议，时分多路复用（TDMA）	2Mbit/s	TTT
ITCAN（Time Triggered CAN）	重视安全，按用途分类的控制用局域网协议，时间同步的 CAN	1Mbit/s	Robert Bosch，CAN
Byte-Flight	重视安全，按用途分类的控制用局域网协议，通用时分多路复用（FTDMA）	10Mbit/s	BMW
Flex Ray	重视安全，按用途分类的控制用局域网协议	5Mbit/s	Daimler-Chry，BWM
D2B/Optical（Domestic Digital Bus/Optical）	音频系统通信协议将 D2B 作为音频系统总线，采用光通信	5.6Mbit/s	C&C
MOST（Media Oriented System Trasport）	信息系统通信协议，以欧洲为中心	22.5Mbit/s	MOST
IEEE1394	信息系统通信协议	100Mbit/s	1394 工业协会

我国汽车电子起步较晚，本土汽车制造商还没有完全掌握车载网络总线技术，这制约着我国车载网络技术的发展。随着技术的引进，CAN 总线开始在国内自主品牌汽车上出现，主要应用在动力传动系统、安全系统（ABS、EBD、ASR、ESP 等）和车身系统（门、窗、空调、灯光、锁、座椅等）。

2. 车载信息娱乐系统

作为车联网的载体，车载信息娱乐系统终端一直是国内外各大车厂和相关企业研究的重要课题。以前的汽车基本只有单一的卡带式收音机，而如今大部分的汽车都配置了信息娱乐

系统，它一般拥有蓝牙免提电话、GPS 导航、网络连接、辅助驾驶、播放多种流媒体格式等功能。目前车载信息娱乐系统不断向着集成化、智能化和网络化等方向发展。车载信息娱乐系统一般包括嵌入式硬件平台、嵌入式操作系统平台和应用软件平台，其中硬件平台和操作系统是两个最基本的部分，而应用软件则可以利用现在已经蓬勃发展的 IOS 或 Android 应用软件生态系统。嵌入式硬件平台主要包括 CPU 模块、外围功能模块和系统所需的电源模块。在 CPU 的选择上主要有 Intel 公司的 X86 平台和基于 RISC 架构的 ARM 平台（搭配相关的 DSP 构成的平台）。X86 是 Intel 公司开发的，使用的是复杂指令集（CISC），运算和图形处理能力较强，但功耗和价格都比较高。而 ARM 平台采用流水线精简指令集（RSC），具有高性能、低功耗、低成本等优点，凭借这些优点占领了车载信息娱乐系统的大部分市场。嵌入式操作系统平台，主要驱动底层硬件，是作为应用软件与底层硬件沟通的桥梁。目前车载信息娱乐系统的嵌入式操作系统主要有 Android 操作系统、QNX 或 Linux 操作系统（都是由 UNIX 操作系统衍生而来的）、Car Play 操作系统（Car Play 实际上就是 IOS in the car 计划，专用于车载的 IOS 操作系统）和 Win CE 操作系统。而在应用软件平台方面，目前只有 IOS 和 Android 两个平台发展比较好，各自的 APP 应用丰富一些，用户比较容易找到自己需要的应用软件。而这其中 Android 操作系统凭借着在智能手机中极高的人气及因此形成的越来越火热的良性生态环境而备受广大汽车制造商和设备商的青睐。

车载信息娱乐系统朝着集成化、智能化、网络化发展，其硬件平台将随着电子信息技术的不断发展而不断提高性能，不断集成更多的功能，具有更强的扩展性；而其嵌入式操作系统及应用软件平台随着行业生态系统的不断改善，必将提供越来越好的用户体验。随着汽车电子技术的发展，越来越多的电子控制单元用于汽车，车载网络必将不断发展。因为应用的不同，一辆汽车可能同时存在多个车载网络。随着技术的发展，将来会出现更多新的车载网络技术和车载网络协议。

13.2 车载网络系统架构设计

目前车载网络正朝着车联网方向发展，车载网络包括车载控制器局域网、局域互联网络及多媒体定向传输系统。其中车载信息娱乐系统是多媒体定向传输系统的车载终端系统。

随着信息社会的发展，人们对汽车的车载控制系统智能程度要求越来越高，车内 ECU 越来越多，相互之间的通信越来越频繁。这种情况下，如果 ECU 之间采用传统的点对点连接方式，车内的线束势必越来越多，汽车内部通信的可靠性、安全性及汽车负载等成为汽车设计和制造的重要问题。为减少车内的线束，实现数据的实时共享，通过 CAN、LAN、LIN、MOST 等车载网络，提高可靠性及安全性等。

在车载网络中，由于要传输的大多是传感器、执行器和开关信息，数据较短，同时因为网络多采用总线型，所以车载网络的体系结构相对简单，主要包括通信部分和网络管理部分，采用的体系结构对应于计算机 OSI 七层模型中的应用层、数据链路层及物理层。由于这种体系结构简单、层次较少，数据传输快，很适合发动机、底盘、轮胎等系统的实时控制和监控。车载网络总线常采用普通双绞线或带屏蔽铜丝网的双绞线。随着车联网的发展，图像及视频传输将被引入车联网中。车载网络系统的拓扑关系如图 13-1 所示。

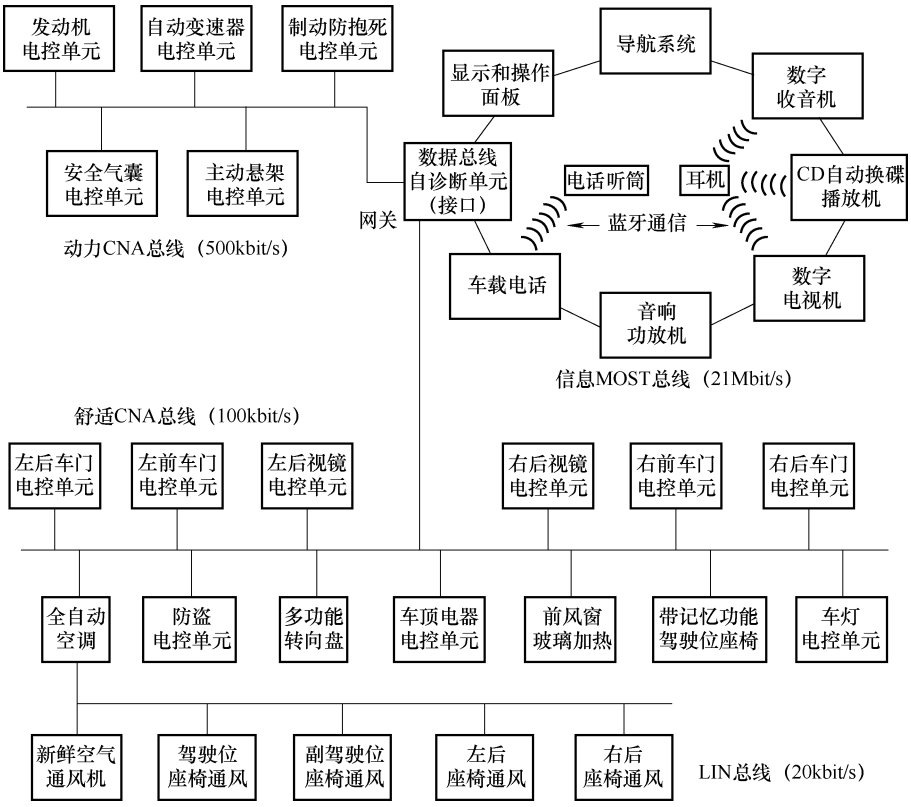


图 13-1　车载网络系统的拓扑关系

13.2.1　车载网络结构模块

车载网络采取基于串行数据通信的体系结构，主要由电控单元模块、数据总线、网络、网络协议和网关五个部分组成。

1. 电控单元

现代汽车除了有发动机电控单元，还有自动变速器电控单元、ABS 电控单元、空调电控单元等许多电控单元，高档轿车有几十个电控单元，因此，必须用网络把它们连接起来，才能资源共享。

2. 数据总线

数据总线（BUS）是电控单元间运行数据传递的通道，简称总线。

3. 网络

在汽车中习惯将几条总线连接在一起的车载局域网称为车载网络。为满足汽车上不同的电控单元对总线系统性能的要求，同时考虑经济成本，一辆汽车上往往采用不同的总线组成车载网络。

4. 网络协议

车载网络协议包括各总线独立通信协议和各总线相互通信协议。

5. 网关

由于车载网络是由不同的总线组成的，就需要一个连接不同总线的特殊网络节点，即

网关。

车载网络系统一般由动力 CAN 总线、舒适 CAN 总线和信息 MOST 总线联网组成，网关是它们的连接点。在舒适 CAN 总线下还有一个辅助的 LIN 总线。

13.2.2 车载网络总线分类

按照协议特性，美国汽车工程师协会（SAE）的汽车网络委员会把目前车载网络总线分为 A（低速）、B（中速）和 C（高速）三类。

A 类：局域互联网络（Local Interconnect Network，LIN）。

A 类总线是数据传输速率小于 10kbit/s 的低速网络。它主要用于控制传感器和执行器，如控制后视镜、车窗及灯光等。它还可以用于数字传感器或执行器的通信。A 类常用的总线是 LIN 总线，LIN 总线使用串行异步通信（UART）的数据格式，构成了单线 12V 的主从结构，是一种广泛应用于汽车电子控制系统的车载总线系统。LIN 总线凭借着各种优点获得了广泛的应用，将来可能成为 A 类汽车网络总线协议的标准。

1998 年，宝马、沃尔沃、奥迪、大众、戴姆勒-克莱斯勒、摩托罗拉和 Volcano Communication Technologies 联合成立了 LIN 联盟。LIN 联盟主要针对汽车上使用的内部连接网络制定统一的标准。据 LIN 联盟官方网站的信息显示，LIN 协议规范目前版本是 2.2.A，已经定稿，正在被 ISO 组织转录作为 ISO 17987 标准的第 1～7 部分。LIN 标准包括了传输协议（LIN 的物理层和数据链路层）和传输媒介。

LIN 总线采用主从结构，一个 LIN 总线网络允许有一个主节点、多个从节点，主节点同时有主任务和从任务，从节点只有从任务，主任务负责决定总线上的报文，从任务负责发送数据，因此一个 LIN 网络包含一个主任务和多个从任务。

因为在总线上同时只允许一条信息，LIN 总线并不需要解决总线冲突的问题。LIN 总线提供了一种低成本的车载网络总线，它用于对通信速率要求不高的场合，对其他车载网络总线来说，是一个很好的补充。也正是由于拥有众多的优点，目前 LIN 总线也被越来越广泛地应用到汽车网络中，它已经被 ISO 组织引用到相应的 ISO 标准中。

B 类：控制器局域网（Contro11er Area Network，CAN）。

B 类总线是数据传输速率在 10～125kbit/s 的中速网络，它主要应用于 BCM 模块、仪表显示模块等传输数据的场合。B 类常用的总线是 CAN 总线。CAN 总线是一种使用串行的数据格式，允许存在多个主节点，数据传输速率可达 1 Mbit/s 的总线。它可以使用双绞线、同轴电缆或光纤作为传输媒介。目前 CAN 总线存在两种标准：ISO 11898 和 ISO 11519。各汽车制造商都广泛使用了这两种 CAN 总线标准。

CAN 总线特点：①同一网络中的节点没有主从之分，任何一个节点都可以发起数据通信，通信顺序由各个节点的信息优先级来确定；②同一时间有多个节点发起通信时，按照优先级来决定通信顺序，因此不会导致总线信息拥塞；③对于一个特定的网络，其通信距离和通信速率成反比。当通信速率低于 5kbit/s 时，传输距离可达 10km；当通信速率达到 1Mbit/s 时，传输距离缩短至小于 40m。因此 CAN 总线适用于通信速率高、传输距离短或通信速率低、传输距离长，节点无主从之分的场合。

C 类：面向媒体系统传输（Media Oriented Systems Transport，MOST）。

C 类总线是传输速率在 125kbit/s～1Mbit/s 的高速网络，它主要用于高速、实时、闭环

控制的多路传输，例如，用于发动机、自动变速器、ABS 等电控单元。随着汽车网络技术的发展，人们将开发越来越多的适用于高速网络的总线协议。常用的 C 类总线有：

高速 CAN 总线和协议：在 C 类标准中，高速 CAN 总线广泛应用于欧洲的汽车制造商，它采用 ISO 11898 标准协议。

安全总线和协议：安全总线主要针对汽车的安全性能，例如，用安全总线将加速度计、安全传感器等装置连接形成整个安全气囊系统，为用户提供安全保障。目前存在的安全总线和协议有德尔福公司的 Safety—Bus 总线和宝马公司的 Byte-Flight 总线等。

MOST 网络一般采用环型的拓扑结构，它以光纤为传输媒介，通信速率可高达 25Mbit/s，远远高于传统汽车网络，非常适用于需要大量数据传输的多媒体系统。因此主要应用在汽车信息娱乐系统。

13.3　车载信息娱乐系统架构设计

车载信息娱乐系统由 CPU 处理器、车身总线系统、互联网服务及各接口组成，能实现包括地图导航、实时交通信息、多媒体、辅助驾驶、车辆状态与故障检测、移动网络及 TSP（Telematics Service Provider）服务等实用性的功能，极大地提高了汽车的安全性和用户使用的方便性。常见的模块有系统模块（包括操作系统和 CPU 模块）、接口及显示存储模块（USB、触摸屏、显示屏等）和媒体处理模块（包括收音机，DVD，摄像头等）、通信模块（GPS、蓝牙、CAN 和 3G 等）。下面简要介绍一下这些模块以及应用到的相关技术。

13.3.1　操作系统

目前，车载信息娱乐操作系统有 Android、Rockchip PX5、TOSHIBA 等，但 Android 系统应用最为广泛。本书仅介绍 Android 操作系统。

Android 是一种源代码开放的操作系统，它基于 Linux 内核，可根据需要裁剪内核，主要应用于移动设备，由 Google 公司及它组建的 OHA 组织主导开发。在中国，大部分人称为“安卓”。Android 操作系统最早由 Andy Rubin 团队开发，后被 Google 公司收购。之后 Google 组建 OHA 组织对 Android 系统不断进行完善并发布了源代码。最初 Android 主要应用于手机，后来逐渐扩展到平板电脑及电视、数码相机、游戏机等其他领域。随着逐年的发展，Android 的市场占有率越来越高，到 2013 年，也就是 Android 推出的第五年，全世界采用它作为操作系统的设备已经达到 10 亿台。

作为一款开放的操作系统，Android 包含了内核空间和用户空间。它具有众多的功能和庞大的代码，其代码基于 Linux 内核，在用户空间又分成本地代码（C 和 C ++）和 Java 代码两种。Android 系统从下到上划分为 Android 内核及驱动、本地库及 Android 运行环境、Android 应用程序框架和 Android 应用程序四个层次。Android 内核及驱动、本地库及 Android 运行环境之间是内核空间与用户空间的分界线；本地库及 Android 运行环境、Android 应用程序框架之间是本地代码层和 Java 代码层的接口，Android 应用程序框架和本地库之间通过 Java Native Interface（JNI）机制实现数据交互；Android 应用程序框架和 Android 应用程序之间是 Android 的系统 API。图 13-2 为 Android 操作系统架构图。

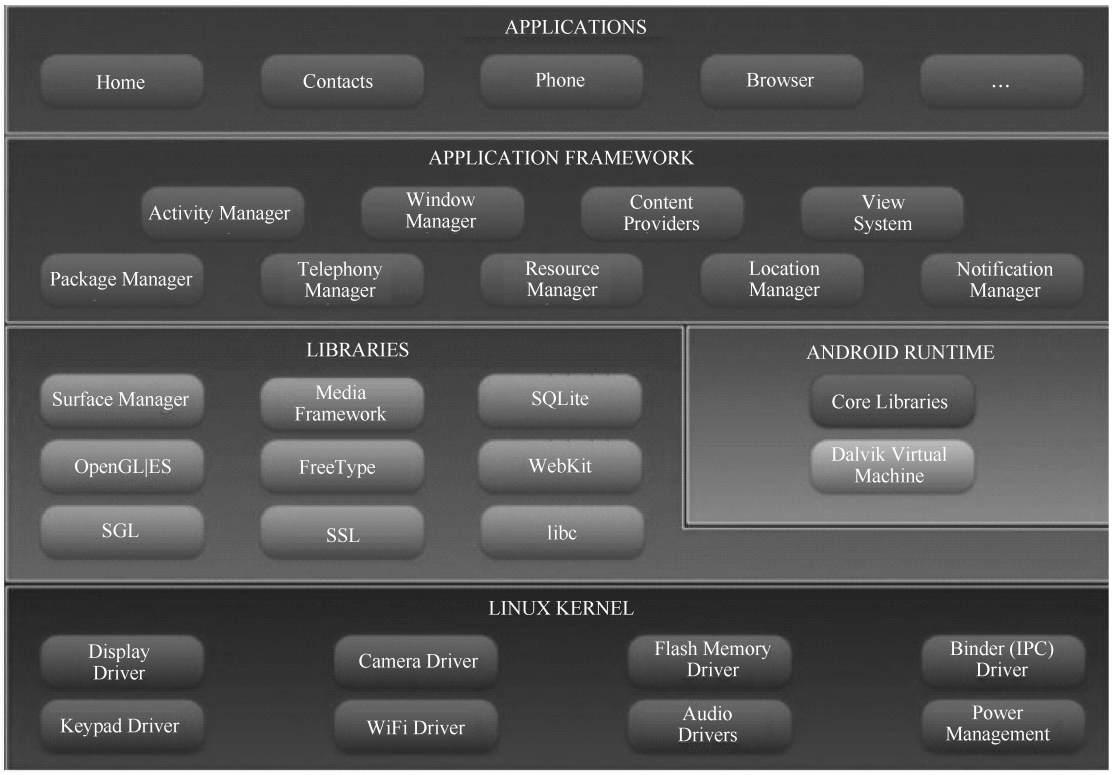


图 13-2　Android 操作系统架构图

Android 几个层次的功能如下所示：

Android 操作系统内核：使用 Linux 2.6 内核，执行安全管理、内存管理、进程管理、网络协议栈和驱动模型等功能。Linux 内核的驱动程序进行封装形成硬件抽象层（HAL），作为硬件和软件之间的桥梁。

Android 本地库：Android 系统中的组件可以使用这些库，Android 应用的开发者可以通过 Android 应用程序框架调用这些库。

Android 运行环境：与 Java 的运行环境相同，由 Dalvik Java 虚拟机和基础的 Java 类库组成，可基本实现 Java 核心库的功能。Dalvik 是 Android 中的 Java 虚拟机，它可以同时高效地运行多个 Java 实例。

Android 应用程序框架：包含了丰富的控件（在 Android 中称为视图）、内容提供器、资源管理器、通知管理器、活动管理器、窗口管理器和包管理器等基本的组件。

Android 应用程序：一般由 Java 语言编写，常用的应用程序如桌面、电话、短信息、E-mail、日历、浏览器、联系人等，一般与系统一起发布。

13.3.2　CPU（ARM）处理器

Acorn 公司的 Roger wilson 和 Steve Furber 最早开发 ARM 处理器，他们在 1985 年时开发出样本“ARM1”，并用它做出了一台 RISC 指令集的计算机，简称 ARM（Acorn RISC Machine），这就是 ARM 这个名字的由来。第二年“ARM2”就实现了量产，它具有 32 位的

数据总线、26 位的寻址空间，并提供 64MB 的寻址范围和 16 个 32 位的寄存器。ARM2 的性能在当时可以算是非常优秀，只需很小的功耗，却能发挥比 Intel 80286 更好的性能，可以算是当时世界上最具性价比的 32 位微处理器之一。1990 年 ARM 开发团队从 Acorn 公司独立出来，另外组建了 Advanced RISC Machines 公司。这也是为什么很多人认为 ARM 的意思是 Advanced RISC Machine 而不是 Acorn RISC Machine。

ARM 处理器虽然经历了多次更新，但是其内核部分却基本维持不变——从 ARM2 有 30000 颗晶体管，到 ARM6 也只有到 35000 颗。半导体制造商通过购买 ARM 公司芯片核心的授权，再自行设计与核心搭配的外围电路构成完整的应用芯片，通过这种方式的使用使产品具有低成本、高性能等优点。

ARM 处理器是 32 位处理器，使用精简指令集（RISC），嵌入式系统的产品基本上都使用它作为控制芯片。

它的特点是：

1）功耗很低，高性价比。

2）支持 Thumb 和 ARM 双指令集，能很好地兼容 8 位/16 位器件。

3）使用寄存器进行数据操作，指令执行速度更快。

4）寻址方式灵活简单，执行效率高。

5）指令长度固定。

ARM 产品目前拥有 ARM7 系列、ARM9 系列、ARM9E 系列、ARM10E 系列、SecurCore 系列、Intel 的 Xscale 和 Intel 的 Strong ARM。其中，ARM7、ARM9、ARM9E 和 ARM10 为通用处理器系列，每一个系列提供一套相对独特的性能来满足不同应用领域的需求。SecurCore 系列主要应用于一些安全产品及应用系统。

13.3.3　存储显示与接口模块

1. 存储器

存储器包括 DDR3 SDRAM、EPROM、EEPROM、Flash，按信息保存性可以分为两类：易失存储器与非易失存储器。易失存储器在断电后立即失去存储在其内部的信息，因此它需要一直供电以保存它的数据。随机存储器（RAM）基本都属于这种类型。非易失存储器则可以在没有电源的情况下仍保存数据。EPROM、EEPROM、Flash 就属于非易失存储器。

按照与 CPU 的接近程度，存储器又可以分为内存储器和外存储器，简称内存与外存。内存是计算机系统中必不可少的一部分，是 CPU 能直接寻址的存储空间，CPU 要执行某个程序必须先将它从硬盘调入内存中运行，特点是读取数据的速率快。RAM 因为读取速率快，一般作为内存储器。随着技术的发展，RAM 经历了 DDR1、DDR2、DDR3 等几代产品的更新。

EPROM 是可擦写可编程只读存储器，写入前必须先用紫外线照射它本体上的透明视窗，把保存在里面的内容清除掉。这一类芯片比较容易辨认，其封装中包含“石英玻璃窗”。EPROM 芯片可重复擦除和写入，但是写入内容时需要用专用的编程器在芯片上施加一个编程电压，写入后用不透光的贴纸盖住，以免受到阳光的照射而导致写入的内容损坏。

EEPROM 是电可擦写可编程只读存储器，用户可以采用高于正常工作电压来擦除和重新编程。正是由于这个优点，个人计算机的主板 BIOS 的 ROM 芯片基本都采用 EEPROM。擦除 EEPROM 不需要其他工具，它用编程电压来修改其数据，而且是以字节为最小修改单位，不需要数据全部删除后才能再次写入，彻底克服了 EPROM 的缺点。

Flash 存储器也是一种非易失存储器，其断电时仍能保存数据。它删除数据时是以固定的区块为单位进行删除，而无法像 EEPROM 一样以单个字节为单位进行删除，这是 Flash 存储器与 EEPROM 最大的不同。

2. 通用串行总线（USB）

通用串行总线（USB）是 Universal Serial Bus 的简称，是一种广泛应用于各种电子产品的接口技术。USB 是一个应用非常广泛的总线标准，用于规范和简化计算机与外部设备的连接和通信。经过多年的发展，USB 接口已成为计算机和很多电子设备的标准扩展接口，USB 协议也从最早的 V0.7 版本发展到现在的 3.1 版本，传输速率不断提高。USB 的数据传输速度很快，USB2.0 的高速模式理论上为 480Mbit/s，全速模式为 12Mbit/s，低速模式为 1.5Mbit/s，在 USB3.0 甚至达到了 5Gbit/s。低速外设的传输线在一般场合可以不需要屏蔽层，但在汽车电子应用环境中因为存在不可控的干扰，所以 USB 传输线需要有屏蔽层。USB 接口适用任何使用 USB 接口的外设，而且支持即插即用、热拔插，不需要安装特别的驱动程序和进行设置。USB2.0 接口包括 4 根线，其中两根数据线（D +/D -）、一根 +5V 电源线、一根地线，标准接口的 +5V 电源线和地线可以提供 500mA 的电流，而在汽车音响和导航系统中为了适应更多外设，实际应用中一般设计了可以输出更大电流的供电电路。

USB 主机设备通过 USB 协议进行通信，在设备插入或拔出主机的接口时，主机能识别到设备的插入或拔出。在主机检测到设备插入时，通过设备上硬件的设置，主机可以识别设备是属于低速设备还是全速设备。之后主机通过枚举从设备读取各种描述符信息，然后再根据这些描述符信息来加载正确的驱动程序，进而成功与设备进行通信。现在开发 USB 相关的产品有两种基本的架构：一种是使用带有 USB 接口的 MCU，另一种是使用 USB 接口芯片转换成其他信号再提供给 MCU。两种架构各有优缺点，前者结构简单，但 MCU 的选择较少，后者 MCU 选择广泛但成本较高，也比较复杂一些。

3. 显示屏与触摸屏

一套完整的车载信息娱乐系统必须包括显示子系统，它是人机交互最重要也是最直接的窗口，几乎所有交互的信息都是通过显示屏的显示和触摸屏或按钮的操作来进行的。显示子系统一般包括三个部分：液晶显示屏（包括触摸屏）、显示驱动电路和按键、旋钮电路。

现在的车载显示屏一般采用薄膜晶体管（Thin Film Transistor，TFT）液晶屏。TFT 液晶屏的每一个像素点由 R、G、B 三个子像素点构成，每一个子像素分别由其后面对应的薄膜晶体管驱动控制，进而形成完整的画面。TFT 液晶屏背面还有背光模组，一般采用白色 LED 作为背光源。液晶屏输入信号的格式一般有射频信号（RF）、复合全电视信号（CVBS）、三基色信号（RGB）、色差分量信号（YCbCr）、S 端子（YC 信号）、低压差分信号（LVDS）、ITU-656、ITU-601、VGA、DVI、HDMI 等，以 RGB 和 LVDS 信号见多。车载用显示屏的尺寸一般是 7 ~ 8in，更大的有 10in。显示子系统在整个系统的成本占到比较高的比例，与用户

交互最多、最直接，而且图像信号处理、传输电路在系统中比较容易受到干扰，加上汽车的座舱温度、电磁兼容等规格要求比普通产品要求更加严格，其设计的质量也直接影响整个产品的用户体验，因此要做好元器件的选型、原理设计及 PCB 布局的设计。

触摸屏是一种人机交互的输入设备，由触摸检测部件和触摸屏控制器组成，提供定位信息给控制器。它是透明的，与显示屏配合使用。与传统的按键操作相比，其表达方式更为直观，可以有多层操作界面，操作界面布局也能设计得更加合理，与软件配合还能支持手写功能。因为汽车上面板的空间有限，加上触摸屏与对应尺寸显示屏的无缝配合，使触摸屏成为用户最重要的输入设备之一。现在触摸屏的基本种类有五种：压力感应触摸屏、电阻式触摸屏、电容式触摸屏、红外线触摸屏和表面声波触摸屏。其中压力感应触摸屏已被市场淘汰；红外线的价格便宜，但它容易损坏及产生光干扰，而且曲面情况下会定位不准；电容式的支持多点触控，但其容易受电磁干扰；电阻式的价格便宜，定位准确，但它容易刮损；表面声波的定位准确，不容易损坏，但它耐脏污比较差。以前车载的触摸屏主要使用电阻式触摸屏，但随着技术的改进，电容式触摸屏克服了容易受电磁干扰的缺点，而且它支持多点触控，大大提高了用户体验，因此它被越来越多地应用于车载产品上。

13.3.4　通信模块

1. 全球定位系统（GPS）

全球定位系统（GPS）是 Global Positioning System 的简称。GPS 于 1958 年开始研制，1964 年投入使用。GPS 的前身是美国军方研制的一种子午仪卫星定位系统，到了 20 世纪 70 年代美军成功研制了新一代卫星定位系统，可以在任何时候提供世界各地的实时导航、搜集情报、应急通信等服务。经过不断的投入和发展，到 1994 年共发射了几乎覆盖全世界的 24 颗 GPS 卫星。

GPS 是一种无线电定位系统，它以已经发射的 24 颗人造卫星为基础，可以在任何时间任何地点向用户提供定位服务。整个 GPS 由三部分构成：一是监控部分，由控制站、地面基站、监测站和通信辅助系统组成。二是空间部分，在 6 个轨道平面上分布着发射的 24 颗人造卫星。三是接收部分，即用户设备，由 GPS 接收机和接收天线组成。

民用 GPS 定位服务的定位精度可达 10m 以内。但为了进一步提高 GPS 定位的稳定性和精度，发展出了 A-GPS 和 D-GPS 两种辅助定位技术。

A-GPS 是 Assisted GPS（辅助 GPS 技术），它用于辅助提高 GPS 的精度。它将接收到的 GPS 定位信息与移动通信基站的定位信息结合，达到快速定位的目的。采用传统的 GPS 技术的接收机只能通过接收卫星发出的无线电信号来进行定位，在信号很差的条件下，接收机可能无法快速地定位，而采用 A-GPS 技术的接收机则可以结合 GPS 卫星的无线电信号和移动网络基站的信号进行快速定位。A-GPS 技术的特点是定位精确度高，在 GPS 信号正常的环境下可达 10m 左右的精度，是目前定位比较准确的定位技术之一；该技术还可以减少第一次定位的时间。同等情况下，采用传统的 GPS 技术第一次定位的时间需要 2 ~ 3min，而采用 A-GPS 技术时最快只需要几秒钟。但是采用 A-GPS 技术时需要接收机接入移动通信网络才能使用。

D-GPS 即 Differential GPS（差分 GPS 技术），它是提高定位精度的另一种技术。为了克服大气影响等造成的误差，安装一台 GPS 接收机在已知精确位置的基准站，然后计算得到

该基准站到卫星的距离差分修正值，并由该基准站实时将该修正值发送出去。用户的接收机在进行 GPS 定位时接收到该基准站发出的差分修正值，对其定位数据进行修正，从而提高定位精度。

汽车 GPS 导航系统是以 GPS 接收机为基础，利用导航地图数据库，实时显示汽车的位置并进行路径指引的导航系统，其原理框图如图 13-3 所示。

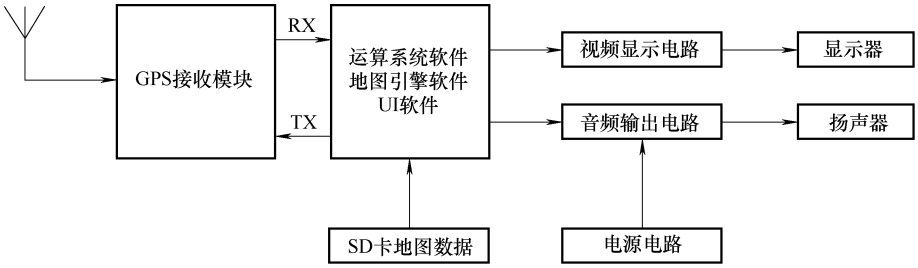


图 13-3　汽车 GPS 导航系统工作原理

从原理框图看出，车载导航系统接收机必须具备接收并处理卫星信号解析出相应的定位信息并根据定位信息和用户的要求提供路径信息的能力，汽车导航系统才能实现导航的功能。而这其中包含了卫星信号接收与解析、地图信息的读取与路径规划、用户操作处理、显示图像、输出声音等众多的内容。所以 GPS 导航系统应包括以下几部分：

1）卫星信号接收系统包括天线和信号放大电路。利用天线接收到微弱的卫星信号电磁波再经过信号放大电路的放大得到增益较大的信号。目前主要使用单极天线、螺旋形天线、微带天线、锥形天线或带扼流圈的振子天线作为 GPS 接收机天线，其中微带天线或者螺旋形天线主要用于单频接收机，而微带天线主要用于双频接收机。

2）卫星信号解调系统对放大的信号进行解调，然后译码出导航电文、GPS 卫星星历和时间等信息，计算出经度、纬度、高度、速度等数据。GPS 采用 NMEA-0183 协议作为发送和接收数据的标准。美国国家海洋电子协会（National Marine Electronics Association）最初为了使海洋导航规范化制定了该格式标准，而如今它已成为一种通用的国际标准。

3）控制、运算系统负责执行系统自检，并测定、校正、存储各通道的时延值。当搜索到至少 4 颗卫星时，它利用获取到的伪距信息和星历信息计算出接收机的坐标，另外它还要进行实际里程计算、速度测量、GPS 坐标转换为制图坐标系统和时间转换/计算等。

4）地图数据处理系统将获取到的定位信息与地图数据相结合实时在地图上显示，并根据用户的设置进行地址搜索、路径规划、实时导航等。

5）其他部分包括操作系统、存储器、图像、声音处理单元等，这些部分也很大程度上影响用户使用导航系统的体验过程。

2. 控制器局域网总线（CAN）

控制器局域网总线（Controller Area Network，CAN）是一种应用广泛的现场总线。CAN 被用于汽车电器微控制器的通信，汽车上主要的 ECU 基本都通过 CAN 节点进行通信，形成控制网络。在一个 CAN 总线网络中，理论上可以加入无限个节点，但在实际应用中，节点数量受网络电气特性所限制。CAN 的数据传输速率可高达 1Mbit/s，可以实现实时控制。另外，它还可以检测硬件是否有错误，进一步增强了抗电磁干扰能力。

CAN 协议用“显性”和“隐性”两种互补的逻辑值分别表示“0”和“1”。当总线上同时存在显性位和隐性位时，总线选择显性位。如图 13-4 所示，CAN_H 和 CAN_L 是 CAN 总线收发器与总线接口的两个引脚，两个引脚之间的电压差代表相应的逻辑值。在隐性状态，CAN_H 和 CAN_L 均处于平均电压附近，表示逻辑值为 1；而在显性状态，CAN_H 和 CAN_L 存在一定的电压差，表示逻辑值为 0。

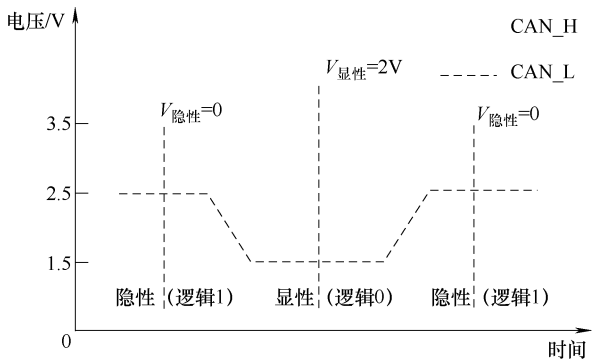


图 13-4　总线上的显性和隐性状态

不仅 CAN 总线上节点数量受网络电气特性的限制，它们之间的传输速率也与网络的电气特性有关。CAN 总线的最大传输距离与传输速率之间的关系见表 13-3。

表 13-3　CAN 总线系统任意两节点之间的距离与对应速率表

位速率/（kbit/s）	1000	500	250	125	100	50	20	10	5
最大距离/m	40	130	270	530	620	1300	3300	6700	10000

3. 移动通信技术

当代流行的移动通信技术有第三代移动通信技术（3G）和第四代移动通信技术（4G）两种。

3G 技术是第三代移动通信技术，它将无线通信与国际互联网等多媒体通信结合，是一种支持高速数据传输的蜂窝移动通信技术。国际电信联盟确定了三个 3G 标准，分别是美国 CDMA2000、欧洲 WCDMA、中国 TD-SCDMA。中国国内支持这三个标准的运营商分别是中国电信、中国联通、中国移动。其中 TD-SCDMA 标准是中国完全拥有自主知识产权的标准，是中国移动通信标准第一次成为国际标准，是中国移动通信技术发展的一个重要的里程碑。

4G 技术则是第四代移动通信技术，它包括 TD-LTE 和 FDD-LTE 两种制式。4G 能以 100Mbit/s 以上的速度下载，能快速传输数据，高质量的音频、视频和图像等，基本能满足用户日常使用的要求。

随着信息化的发展，移动终端在日常生活中扮演着越来越重要的角色，同时对移动网络的要求也越来越高。移动通信技术在这种发展的推动下得到了快速的发展，下一代通信技术 5G 呼之欲出。

13.4 车载信息娱乐硬件系统测试与验证

车载信息娱乐系统要求运行流畅，拥有出色的运算能力，能够实时处理车载网络中的信息，同时还要具有能满足用户需求的功能，除此之外还要具有一定的扩展性，能够支持一些外围设备的接入，处理车载网络信息。

13.4.1 驾驶室“中控台”设计与实现

近年来，日益增长的信息娱乐功能的需求已经从整体架构上显著改变了信息娱乐系统。表 13-4 展示了在不同汽车开发时期的系统集成层次，同时也展示了离线数据和程序服务器的通信增长。

表 13-4 信息娱乐系统的功能

年 份	集 成 层 次	离线数据交换
1970	通过简单与独立的汽车电子电器元件代替机械功能	无
1980	通过独立电子产品的集成增强了功能	无
1990	新颖与额外的信息娱乐功能必须通过汽车电子电器集成元件来实现	小［9.6KB，SMS（数据储存和转发中心），WAP（无线应用协议）］
2000	将所有汽车电子功能集成在一个芯片单元（即电子电器系统）	中等（115KB，GRPS，internet）
2010	在线（on-board）与离线（off-board）功能集成。汽车本身变成了高级“系统中的子系统”的一部分	高级（2MB，UMTS，internet -Java）

独立的功能过去都是由车内独立的设备实现的，如收音机、导航或温度控制，如今它们通常都被集成到一个中心单元中（所谓的“中控台”），由以下 5 个主要元件组成：

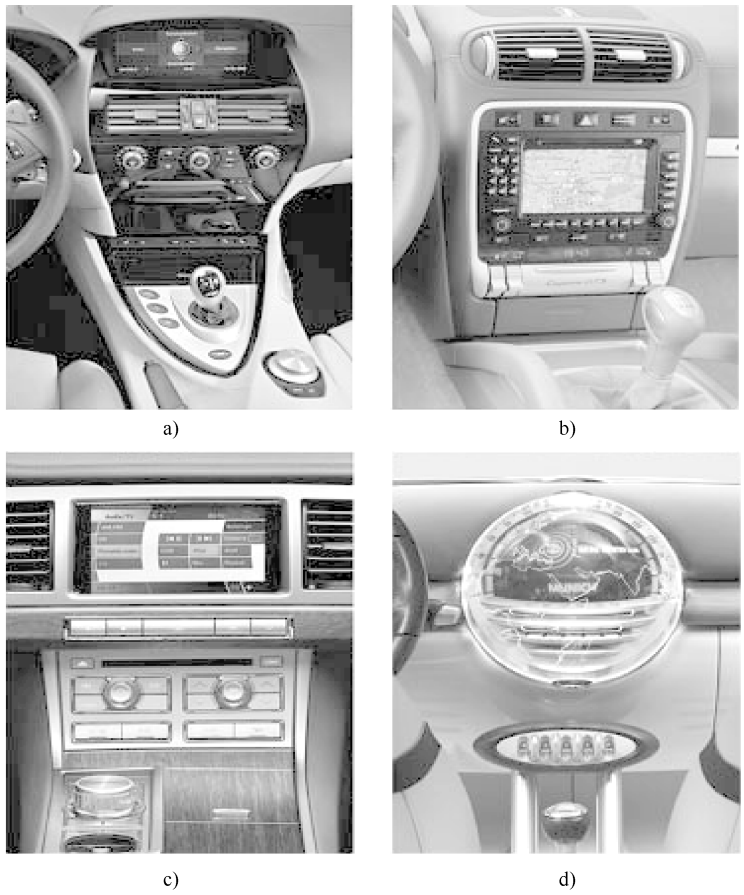
- 一个主控单元（CPU 主板、固态储存单元、图形和声音处理器）。
- 用户菜单软件和集成信息娱乐功能。
- 与中央信息服务器进行数据交换的无线接口。
- 输入控制元件。
- 显示器。

驾驶室“中控台”的主要设计参数：

- 不同的功能访问途径：通过使用主控单元的用户菜单，或者通过使用不同的按钮。
- 中央操作器的位置。
- 用户菜单的一致性与直观性。
- 中央显示器的尺寸、质量和位置。
- 提供额外的显示器，比如，为后座乘客娱乐所设置的显示器，或显示相关信息的平视显示器，平视显示器应该以驾驶人的视角来设定并且尽量减少干扰不致使驾驶人分心。
- 多种操作语言可选。

- 语音、音乐、视频信息的播放质量。

如前所述，制造商对客户要求的不同理解和不同的技术解决方案使它们对“中控台”的设计概念截然不同。图 13-5 展示了 4 个不同的设计方法：宝马 M6 敞篷车（图 13-5a）采用一个控制所有功能的简单中央控制器；保时捷卡宴 GTS（图 13-5b）采用快进键围绕中央显示器的方式；捷豹 XF（图 13-5c）采用一个触摸屏作为输入输出的集成设备；迷你跨界概念车（图 13-5d）采用一个球形 3D 显示屏。



a)　b)　c)　d)

图 13-5　不同车型的中控台布局

另一种被原始设备制造商（OEM）采用的设计决策是信息娱乐系统的功能应该被整合到汽车本身上来取得专利，还有应该提供接口供客户将第三方产品连接到汽车的系统里。

13.4.2　车载信息娱乐系统测试与验证

一般的电器/电子产品集成已经在本书 6.6 节讨论过，把信息娱乐系统集成到汽车上的特殊挑战是电子（功能）和非电子（几何、机械）性能的相互依赖性：如人机界面的中央操作单元就必须符合功能方面的要求（得到希望输入的信号），人体工程学（有关驾驶人的位置、所需的运动、操作产生的音响或视觉反馈）方面的要求，价值感知（触觉、表面诉

求）方面的要求，造型（形状、颜色）方面的要求。在进行信息娱乐系统的功能验证时，所有这些整车特征的要求都必须被制定和测试。

系统测试是整个车载信息娱乐系统很重要的环节，系统测试包括软件测试和硬件测试，测试主要体现在功能测试和稳定性测试。不仅需要对各个硬件模块进行独立的调试和功能测试，以及进行老化测试。软件方面需要进行各种功能性测试，并在老化实验过程中进行内存泄露测试。

车载信息娱乐系统的测试和验证的另一个特殊性，是不仅依赖于新车型骡车平台等实验设施的功能，还跟当地有关汽车标准与法规有关，如对欧洲市场开发的导航系统或手机的功能只能在欧洲测试。

第3部分

整车性能试验与验证

第14章

整车性能试验与体系

为了保证车辆的各项性能，汽车的设计研发需要做更多试验验证。品质验证的核心内容是整车开发需要完成的所有试验（包括整车各性能模块、各系统及所有的关键零部件）以及耐久耐候的品质验证。事实上，建立这样的品质试验验证体系是个庞大的系统工程，每个整车制造商都需借鉴行业最佳实践，并总结和沉淀自身的实践积累，整合内外部资源进行建设，并持之以恒地积累和完善。

14.1 整车性能试验简介

14.1.1 整车性能试验方式

实验（一般认为试验也是实验的一种）是伴随近代工业化革命发展起来的科学技术和方法，实验科学对近代科技发展做出了巨大贡献，通过实验人们可以检验某种新的假说、假设、原理、理论，可以再现某些自然现象，通过实验和试验可以确定认识很多未知的事物。因此，实验或试验对当今科研和技术开发不可或缺。从某种意义上讲，实验和试验是将人类的很多技术从“术”的层次提升到“学”的层次的重要手段之一。

由于汽车生产是一种大量流水的方式，生产的量大、人力和资金投入大、产品的社会保有量也大，一旦产品开发不成功，会给企业造成重大损失，有时甚至导致企业倒闭。同时汽车又是交通工具，一旦出现安全质量问题，造成的生命财产损失和社会影响都是巨大的。因此，车辆开发中的试验验证必不可少，并且贯穿开发的始终。也正是依靠这些试验，汽车技术近年得到长足的发展。

随着汽车开发、生产技术的不断创新，汽车试验验证的手段也高速发展。特别是电子计算机技术的发展，使试验验证的技术得到许多突破。当然，传统的验证技术也还保持着生命力。当前最常用的整车试验验证方式有：

- 整车道路（公路）试验。
- 场地道路试验。
- 整车台架试验。
- 整车动、静态主观评价试验。
- 计算机仿真验证分析。

14.1.2 整车开发各阶段的试验验证

整车的试验和验证与整车开发的各个阶段总是相互伴随的：

- 建立目标阶段伴随有对标样车的试验、评价；

- 设计开发阶段伴随有数字样车的数据仿真验证分析、骡车的专项性能试验、功能（FT）样车的各项功能性验证和车身相关试验；
- 生产准备阶段伴随有工程（ET）样车的耐久试验验证和评价及标定和法规认证；
- 试生产阶段伴随有生产（PT）样车的品质验证确认。

整车开发各阶段的样车和试验验证举例见表 14-1。不同企业的产品开发流程和能力不同，不同项目的产品开发策略和范围及深度各有差异，项目团队的试验管控能力有高有低，都会导致数据和样车受到不同程度的影响，故表中样车对应的数据发放时间和第一辆样车的提供时间仅供参考。

表 14-1　整车开发各个阶段的样车和试验验证举例

样车类别		产品数据	零部件状态	第一辆时间	目　的
骡车		-35 月	手工/简易工装	32 月	验证性能
FT 样车	—	-27 月	车身件（上装 + 下装）：软模/手工/简易工装 底盘件：硬模	21 月	验证功能、性能
	国 5			20 月	验证排放耐久
ET 样车	—	-16 月	硬模	10 月	验证工装
	公告车		硬模	9 月	申报公告
PT 样车		-6 月	硬模	5 月	验证生产线

将其放进具体流程中（图 14-1），我们可以更清楚地看到整车开发各个阶段相伴随的试验和相互印证的仿真。

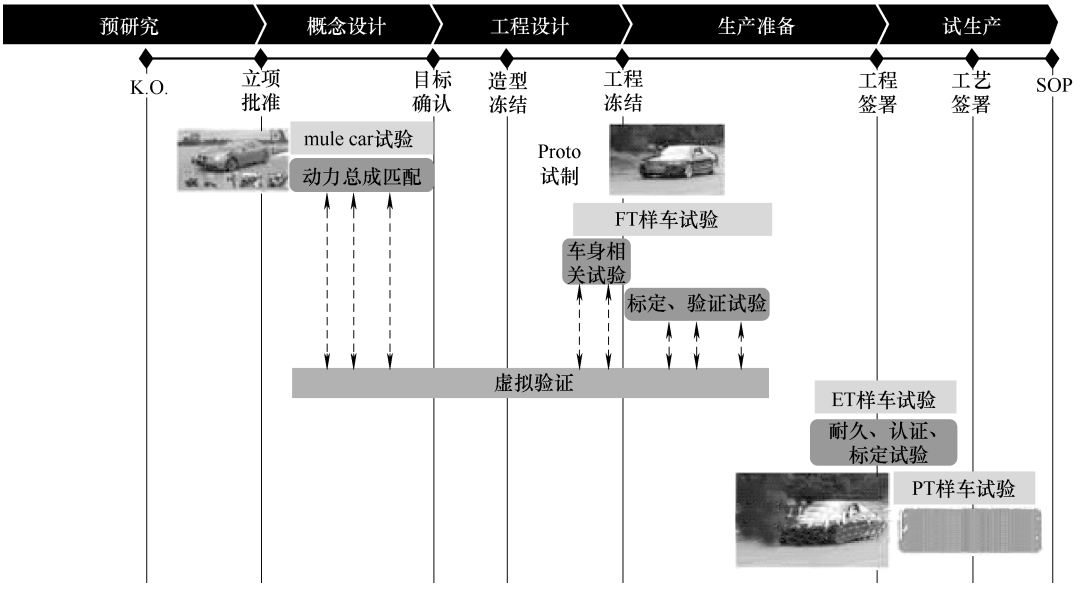


图 14-1　整车开发各阶段的试验验证过程示意图

一般来说，项目初期确定目标时就要对新车型（原型车）进行试验以建立目标；在整车开发的过程中，由于有些系统和模块可以或者需要先行，常用骡车的方式等先期进行试验，此时如果已经建立了 3D 数据，可以同时进行 CAE 仿真；概念样车设计出来后，如果是

某个平台产品系列的首发基础车，大多要进行 FT 样车开发，进行针对设计是否适合的相关试验。在 FT 样车试制前，反复进行 CAE 仿真验证并据此修改设计，以此使设计成为当前经验下的最优；通过生产准备，得到 ET 样车后，又会进行针对工程开发（产品的工程设计和工艺工程开发）质量的大量试验；试生产阶段则需要用 PT 样车进行产品最终的品质验证确认。伴随这些试验，设计和工艺过程不断优化直到达到初始设定的目标并满足商品销售为止。由此可见，试验和验证始终伴随着整个开发过程。没有试验和验证的设计开发是盲目的。

14.2 整车试验规范与验证体系

验证是产品开发过程中必不可少的环节。由于计算机辅助技术的不断发展，整车开发过程中的验证、试验逐步前移（时间前移，从整车分解到系统直至零部件）和虚拟化，使得开发的周期缩短、费用节省。

如果说验证体系是自主品牌车企建设正向开发体系和产品开发能力的基石，那么试验规范的确立（认可）、试验规范的分解和传递、试验分类则是建立验证体系的关键基础环节。

14.2.1 整车试验规范的确定

验证首先要确定试验方法和接收标准，统称为规范。对于整车开发试验验证来说，主要有：

- 道路试验规范：包括道路工况统一确认、路谱采集、气候环境条件统一确定、燃油条件、区域使用习惯、性能试验方法。
- 台架试验规范（外委开发件的规范需要和供应商共同认可）：包括路谱传递、静强度和疲劳加载量、环境因素加载、性能测试方法。
- CAE 仿真：包括项目和道路、台架对应，加载量、环境条件和实物试验对应，接收准则和实物试验一致。
- 主观评价：包括评价分值分段、评价项目、评价场地条件、评价人员素质认定。

试验规范实际上就是针对车辆使用环境而制定的试验方法、考核强度、接收标准等。

- 使用环境：使用环境涉及道路工况（道路的好坏程度、道路不平度、各种路面比例、最高海拔等）、环境气候条件（最冷、最热、潮湿等）、地区的燃油条件、区域使用习惯（如出租车）、所在国的法规要求（包括电磁干扰）等，这些都构成了汽车设计的输入条件，同时也是考核、试验验证的基本内容，参见表 14-2：

表 14-2 车辆使用条件和验证分布表

工作条件		状态量化	统计分析和确定	主要考核部件
道路状况	坏路状况	不平度均方值	总里程占比	底盘和车身
	弯道状况	弯道半径和每千米个数	总里程占比	转向和悬架
	坡道状况	坡度及坡长	总里程占比	动力和制动性
	高速路面	最高车速	总里程占比	动力传动系统和轮胎
	城市道路	红绿灯和减速、起步、跟车和掉头转向频率	总里程占比	变速器、发动机操控响应、转向、制动
	海拔	最高海拔和氧含量	最高海拔限值	动力系统和制动

（续）

工作条件		状态量化	统计分析和确定	主要考核部件
气候状况	高温	最高环境温度和地面温度	最高温度限值	冷却系统、空调和轮胎
	低温	允许车辆停放的露天温度	最低温度限值	起动系统、油液、非金属件、空调除霜除雾、电子电气
	湿度	空气湿度和盐类含量	湿度限值	金属件的防腐
	灰尘	空气尘土密度和颗粒度	灰尘类型及对运动部件的破坏模式	与尘土接触的运动件和滤网
燃油条件	油料品质	辛烷值和各类杂质限制		燃烧系统和排放装置
区域使用习惯	出租车	快起动、快制动、夜间行驶多		制动、转向和供电平衡
	长距离行驶	续驶里程特殊要求		油耗和油箱容量

在上述使用环境分布分析的基础上，主机厂定期实施道路、环境和使用方式工况调查、采样、数据分析和筛分，建立考核验证项目系统、确定考核强度，固化基本路谱和其他各项极限考核条件，以此作为试验的输入和传递的基础。

14.2.2　整车试验项目类型

整车试验项目类型主要分为：

- 功能（即性能）；
- 强度（极限工况不至于失效的能力）；
- 耐久性及可靠性（整车和部件的使用寿命、确定期间内不出故障的质量能力）。

根据考核类型确定试验方法：

- 整车公路试验：实际环境考核耐久和可靠性；
- 整车场地试验：考核性能、耐久和可靠性；
- 整车台架试验：主要考核性能；
- 整车动静态主观评价：以对比打分的形式评价性能。

其中，公路试验一般要记录路况、气候、里程、故障状况等，以便汇总分析；场地和台架性能试验各主机厂应有自己的标准：含测量仪器、试验规程，耐久和可靠性试验有明确的针对考核部件的试验场路面选择及里程确定、循环次数规定，并建立这种浓缩试验和用户实际使用的里程当量。主观评价则由一批经过专门训练的合格评价师，设计相关的评价方案和项目表，然后逐车逐项进行评价记录，最后汇总比较。

14.2.3　试验规范的分解与传递

汽车零部件集成度高，因此整车集成时的达标不确定性也很高。为了降低由此带来的项目风险，设计上将整车逐级分解为系统、部件和零件，试验验证也逐级将考核验证分解下去，以便在零部件集成前先期验证，将验证对象隔离开，将设计开发问题识别前移，将复杂问题简化。

当零部件设计完成或试制出来后，逐次按自上而下分解的设计目标进行试验验证（当采用 CAE 仿真时，零件独立出来分析；进行零部件或系统验证时，一般都要模拟整车工况设计台架试验环境），在下一级验证合格后，再进行上一级的验证，直至整车。

以此保证每一个独立的部件和系统分别达标，保证整车集成时问题的单一性，使得最后整车交付的质量容易达标，项目做得干净而不是拖泥带水。

14.3 整车试验项目清单

由于新排放法规的要求，试验里程特别长，其样车计划需要特别考虑。表 14-3 是汽车正向开发需要进行性能测试的项目清单。表中的试验分类是从项目管理的角度考虑的。根据试验的目的和对样车的要求，项目部门需要依据开发流程进行很好的规划，保证设计、试制、验证时间上的良好匹配，使参与开发的各个部门有条不紊地工作，而不是项目跟踪所到之处，加班加点拼命干，其他部门则可能等待或窝工。

需要注意的是，表 14-3 中的综合性试验的车辆必须全面达到阶段质量目标，试验考核才能得出期望的结论；单一系统的调校和标定，则根据需要，保证必须验证的部件和相关试件满足要求，其他部件经使用部门认可后要求可以放宽。

根据新排放法规的要求，试验里程要求更长，其样车计划需要特别考虑。表 14-3 是汽车正向开发需要进行性能测试的项目清单。

表 14-3 汽车正向开发需要性能测试的项目清单

一级类别	二 级 类 别	具体试验内容
整车测量	磨合	1500km 磨合
		3000km 磨合（新车做性能试验需要磨合 3000km，其他试验需要磨合 1500km）
	检查性试验	汽车技术状况行驶检查
		车速表校正
		滑行（初速 50km/h）试验
		行驶阻力滑行试验
	动力性能试验	原地起步连续换档加速试验
		超越加速性能试验
		最高车速试验
		最低稳定车速试验
		最大爬陡坡试验
		发动机 1000r/min 对应各档位下的车速
		驾驶性主观评价（3 人）
		暖机驾驶性评价——发动机（3 人）
		坡道起步 & 爬坡能力评价（3 人）
		换档功能/换档舒适性——手动变速器（3 人）
		变速杆行程/换档力测量——手动变速器
		变速杆振动及跳档
		驾驶性评价——手动变速器
		离合器总成啮合试验
		离合器行程及力的测量
		加减油评价
		加速踏板行程及力的测量和评价

（续）

一级类别	二 级 类 别	具体试验内容
整车测量	经济性试验	等速行驶燃料消耗量
	制动性能试验	制动系统检查性试验
		制动磨合试验
		单一冷态制动试验
		驻坡制动试验
		0 型试验（不含附加试验）
		I 型试验（国家标准）
		应急制动试验
		行车制动系统部分失效试验
		行车制动系统剩余制动性能试验
		转弯制动试验
		涉水失效制动性能试验
		ABS 制动性能试验
		制动系统主观评价（3 人）
		制动距离试验
		踏板感觉试验
		制动系统热衰退试验（Prototipo）
		制动噪声评价（3 人）
		制动平衡试验
		驻车制动力及行程
		制动拖曳力确认
		驻车制动拖曳力确认
		制动踏板与加速踏板间距
		下长坡试验
		制动磨损——城市工况（5000km）
	操作稳定性试验	转向盘扭转振动
		转向　KICK BACK 测量
		转向刚度测量
		转向力测量（静态）
		转向力测量（低速）
		转向盘垂直振动
		前悬架误操作试验
		坑洼撞击试验
		后轮侧向撞击试验
		后轮纵向冲击试验
		蛇行试验
		转向盘转角阶跃输入试验
		转向盘转角脉冲输入试验
		转向回正性能试验
		转向轻便性试验

（续）

一级类别	二级类别	具体试验内容
整车测量	操作稳定性试验	稳态回转试验
		双移线试验
		操控和转向性能主观评价（3 人）
		连续正弦扫描输入试验
		弯道动力变化影响试验
		俯仰角测量试验
		摆动稳定性试验
		后轴最大载质量下操纵稳定性评价
		轮胎湿路面试验
		防滑链间隙测量
		轮胎操纵稳定性舒适性试验
		雪地轮胎操纵稳定性试验
		轮胎舒适性试验
		麋鹿试验
		操稳（悬架系统）调校试验
		转弯制动试验
		汽车重心高度测量
		转向系统角传动比测量
		转向系统摩擦阻力测量
		增幅正弦转向试验
		响应增益试验
	平顺性试验	汽车平顺性脉冲输入行驶性试验
		汽车平顺性随机输入行驶性试验
		汽车悬架系统的固有频率和阻尼比测量
		高原气候性试验
		热带气候性试验
		寒带气候性试验
	环境适应性试验	高原气候性试验
		热带气候性试验
		寒带气候性试验
	密封性试验	防雨密封性试验
		防尘密封性试验
	碰撞性试验	正面碰撞试验
		侧面碰撞试验
		后撞试验
		两车正面对撞（等速和不等速）
		两车成角度碰撞（等速和不等速）
		车辆静态翻转试验
		安全气囊匹配试验

（续）

一级类别	二级类别	具体试验内容
整车测量	耐久性试验	3 万 km 强化坏路试验
		5 万 km 综合试验（1.5 万 km 山路 +3.5 万 km 普路）
		10 万 km 高速试验
		3 万 km 综合性能试验（18000km 高速 + 4000km 山路 + 4000km 普路 + 4000km 坏路）
		10 万 km 混合工况试验（40000km 高速 + 5000km 山路 + 20000km 普路 + 35000km 城市工况）
		5 万 km 城市工况试验
		变工况（变速器）循环试验（按照 1000 个试验循环） 1.5 万 km 山路
	耐久性试验（单天里程）	高速路试验（600km/天）
		山区公路试验（288km/天）
		强化坏路试验（270km/天）
		一般公路试验（330km/天）
		越野路试验（140km/天）
		城市工况试验（210km/天）
		离合器磨损试验
NVH（噪声、振动与声振粗糙度）	主观评价	从顾客角度进行各种路面及工况下整车 NVH 性能评价
	进气系统噪声测量与改进	有和没有进气系统的车内噪声测量
		进气口噪声测量
		空气滤清器辐射噪声测量
	排气系统振动噪声测量	有和没有排气系统的车内噪声测量
		排气口噪声测量
		排气系统辐射噪声测量
		排气系统传声损失
		排气系统振动测量
		排气系统噪声/振动传递函数检查
	空调系统噪声测量	手动调节空调系统噪声
		自动调节空调系统噪声
		出风口噪声的测量
	电器件工作噪声测量与检查	中控锁噪声测量
		电动门窗及天窗噪声测量
		发动机冷却风扇工作噪声测量
		电动后视镜噪声测量
		刮水器清洗器电动泵工作噪声测量
		燃油泵工作噪声测量
		电动座椅电动泵工作噪声测量
	发动机振动噪声检查与测量	发动机附件固有频率测量
		发动机一阶固有频率测量
		发动机附件振动测量

（续）

一级类别	二级类别	具体试验内容
NVH（噪声、振动与声振粗糙度）	发动机振动噪声检查与测量	发动机扭振测量
		发动机台架噪声测量
		助力转向器噪声测量
		发动机声强分析
	控制件振动测量	变速器控制杆振动测量
		转向盘振动测量
	传动系统振动噪声测量	传动轴的模态测试分析
		传动系统振动与噪声测量
		变速器的 Rattle 和 Whine 声检查评估
	车身附件	车内 Squeak 噪声检查
		座椅振动测试
		后视镜振动测量
		材料隔声性能试验
		材料吸声性能试验
		密封性检查
		防火墙的传声损失
		仪表台的插入损失
	发动机悬置系统	发动机悬置振动测量
		发动机悬置系统振动噪声传递函数分析
	整车悬架系统	整车舒适性测量
		轮胎不平衡引起的车内振动
		副车架胶套衰减函数测量分析
		悬架振动传递函数分析
	车身结构	白车身模态测试分析
		车门相关噪声测量
		整车模态分析
	整车噪声振动测试	整车行驶和滑行时 X 方向振动测量
		发动机怠速整车振动测量
		整车车内噪声测量
		典型路面上整车车内噪声测量（风噪声）
		发动机开启与停止时车内振动噪声测量
		整车定置车内噪声测量
		轮胎噪声测量
		整车加速车外噪声测量
		整车怠速噪声测量
		匀速车内噪声测量
HVAC（采暖通风与空调系统）	排放与经济性	常温排放检测
		低温排放检测
		曲轴箱排放物
		汽油车双怠速排放污染物

（续）

一级类别	二级类别	具体试验内容
HVAC（采暖通风与空调系统）	排放与经济性	整车 8 万 km 排放耐久性试验
		碳平衡法油耗试验（ECE + EUDC）
		等速油耗试验
		排气背压测量
		燃油管路气阻试验
	整车空调系统试验	整车空调充注量试验
		整车空调降温试验
		整车空调升温试验
		整车保温试验
	冷却系统试验	整车冷却系统验证试验（标准 1）
		整车冷却系统验证试验（标准 2）
	温度场试验	发动机舱温度场试验
		排气系统温度场试验
	耐侯性试验	整车冷起动试验
		整车热起动试验
		整车耐侯性检查试验
		零部件耐侯性检查试验
		除霜试验
		除雾试验
	仪表校核试验	车速表里程表校核
		燃油表校核
		冷却液温度表校核

第15章

新车排放试验与验证

15.1 概述

长期以来，汽车行业中的可持续性意味着无论是汽车本身还是相应的生产流程，从根本上说都是环境友好型的。对于汽车制造商而言，这意味着需要遵循法规要求，而这通常是和它们的经济目标相冲突的。20 世纪 60 年代中期，洛杉矶等城市中的烟雾变得令人难以忍受，政府迫于市民和环保激进分子的压力，不得不颁布排放法规来迫使生产商将汽车尾气中的污染物限制在一定范围内，以维持或恢复当地的空气质量。而燃油经济性也经历了这样一个过程：在 20 世纪 50 年代初期的第一次石油危机期间，美国强制施行了相关法规，如能源政策节约行动法（能源政策保护法），以降低燃油消耗。当然，与节约全球化石能源储备相比，这么做的初衷更偏向于希望在政治和经济上减少对进口原油的依赖。

现如今，一种更加综合的可持续理念正在汽车行业中盛行着。除了减少或消除污染、减少不可再生资源的消耗，如化石燃料，可持续发展还包括慈善和经济方面的问题。可持续发展的三个主要目标是维护一个完好的生态环境、身心健康的人类社会和经济繁荣的商业活动，这三个目标相互依存，因此具有同等的重要性。从长远来看，社会责任感、合理的生态环境和经济管理则代表了最具人性化和最经济的经商方式。生态效益（Eco-efficiency）是指在提供具有价格竞争力的、满足人们需求和创造生活品质的产品与服务的同时，逐步减少产品整个生命周期中对生态的影响和资源的消耗，以达到与人们估计的地球承受能力至少相一致的水平。

作为长期经济繁荣（也是长期的股东价值）的主要驱动力，企业的可持续发展能力同样也是投资者眼中重要的评判标准。可持续发展势头强劲的公司能抓住机遇，稳健地应对来自经济、环境和社会发展的风险。道琼斯可持续发展指数（DJSI）跟踪全球以可持续性为发展动力的领头公司的经济表现，并从可持续发展角度向投资者提供公司的经济实力和排名。

另外，可持续性的内涵也在近几年发生了变化：不再单纯局限于满足法规要求，可持续性本身已经成为一个和消费者相关的特征。例如，以前没有一个汽车市场（个别除外）会愿意支付因超过法定排放要求而产生的额外费用，而现在的消费者已经开始将可持续性当作一辆汽车与众不同的重要特点，并可能愿意为此买单。这个趋势可以从零排放政策施行之前，电动汽车高涨的需求量中看出来。可持续性作为一个独立的汽车特征，主要包括以下四个方面：

- 汽车对燃料或其他形式能源的消耗。
- 汽车对于环境的排放，包括气体、噪声和电磁领域。

- 汽车使用周期结束时的报废流程。
- 汽车交付前，生产商制造流程的可持续性。

此外，对于汽车消费者来说，社会认可度也担当起前所未有的、越来越重要的角色。驾驶一辆有着“油老虎”或“污染者”恶名的汽车会激起社会各界的负面情绪，这种负面情绪甚至会发展成为公开的攻击，比如，2003 年发生在洛杉矶的环保主义者纵火焚烧悍马专卖店事件。甚至可以更加严格地说，如果一家汽车制造厂商总是有一些不负责任的管理行为，如污染环境的生产流程、对员工的不公正对待，或者对全球零部件供应商的剥削行为，若你驾驶一辆由该厂家生产的汽车，那么公众可能认为是不可接受的。由于人们期望公共企业管理层能树立一个榜样，对于面向企业和大众消费者的汽车来说，在制造可持续发展的汽车方面达到或超出人们的预期甚至显得更加重要。

对可持续发展的汽车开发方案（如新能源车）进行评级，需要一套全面的可持续性评估手段，包含以下四个方面：

- 汽车全生命周期（市场推广、研发、生产、物流、使用、报废措施）。
- 整个供应链（包括承包商、服务供应商等）。
- 可持续性的三个方面（环境影响、社会影响、经济影响）。
- 所需的全部产品和服务（车辆、燃油、交通环境）。

只有全面考虑可持续性评价的各种影响因素（表 15-1），才能对备选（可选）的解决方案做出客观的评估，从而做出决定。

表 15-1　可持续性评价的影响因素

	流程要素（包括完整的价值链）					
	营销	研发/规划	生产/实现	零售	使用	报废流程
车辆	商业活动 市场调研	设计 测试	制造 后勤保障	运输 销售	驾驶 维修、保养	拆解、循环利用、废物处理
驱动能源	商业活动 市场调研	试验	来自主要能源的转换	运输 临时转换	转化为推进力	预留物处理
交通环境	商业活动 市场调研	道路规划 交通控制 系统设计	安装 道路建设		运行 维修 保养	拆解 循环利用 废物处理

15.2　新车尾气排放和能耗测试

在主流观念看来，能源消耗和由其造成的排放紧密相关，所以两者的可持续性将在本小节中一起讨论。

15.2.1　相关法规要求

1. 燃油消耗效能

化石燃料（柴油和汽油）已经是并且到目前为止依然是机动车能量的主要来源。长久以来，汽车生产厂商将燃油经济性看成是一种成本负担，而不是节油所带来的可观的经济效

益。但是，近年来油价的飞速上涨将为数不多的全球油品供应商再一次摆在了聚光灯下。像壳牌能源消耗计划（图 15-1）这样的世界能源消耗长远规划更加凸显了对于来自可再生能源而不是化石燃料的主要能源的需求，并使得消费者更愿意将可持续性作为选购汽车的标准之一。

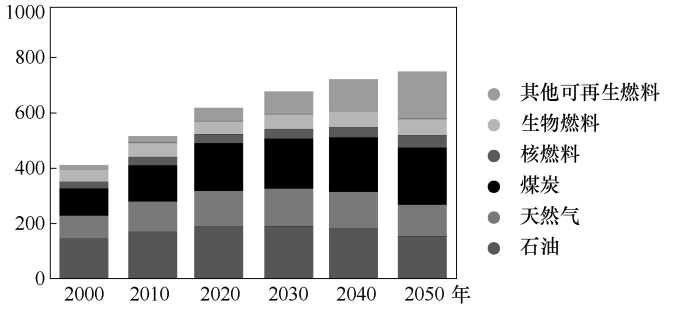


图 15-1　壳牌公司能源消耗计划图

由于目前还没有直接（相关）的法规来限制燃油消耗，为了降低燃油消耗，政府的主要调控措施是增大高耗油汽车的使用（油耗）成本。从全球范围来看，已有法律法规规定了向消费者和制造商收取相关费用的条款。

- 将经济负担直接施加在消耗能源上的税种称为燃油税。例如，在德国，在加油站收取的常规汽油费用中，有 68% 来自燃油税。这里有个简单的平衡关系：汽车消耗越多的燃油，拥有者就要花费更多的金钱。但是，也有人以不公平为由批评这种做法，因为这使得个人旅行和由此产生的污染变成了有能力承担油费者的特权（油费承担者有了在个人旅行中产生污染的特权）。
- 与此相反的一种做法是，消费者被要求强制缴纳那些未能达到最低燃油经济性水平汽车的所谓“油老虎税”，该税施加在汽车的售价之上。这种做法有一个明显的缺陷，那就是“通膨效应”：消费者在一次性支付全部费用后，驾驶汽车的里程越多，每千米的相应费用就变得越低，这反而会鼓励他们驾驶尽可能多的里程，导致尽可能多的燃油消耗。
- 另一种政府调控的手段是，基于所生产汽车的平均燃油消耗量，通过对汽车生产厂家强制收税的方法来遏制高耗油汽车的生产和销售。例如，在美国，如果厂家销售的轿车和轻卡的平均燃油经济性未满足平均燃油经济性（CAFE）标准，那么生产商就必须支付罚金。

另外，减税政策或福利，如允许使用拼车通道（Car-pool Lane）等可以增加高燃油经济性汽车对于潜在消费者的吸引力。

2. 尾气排放标准

说到汽车排放，首先映入人们脑海的就是汽车所排放废气中的各种成分：

- 一氧化碳（CO）；
- 二氧化碳（CO_2）；
- 碳氢化合物（C_nH_m），如甲烷；
- 氮氧化物（NO_x）；
- 部分未燃尽的燃料；

- 颗粒物（PM），如黑炭。

近年来，世界范围内关于尾气排放的限制法规已经大大加严了。现行的法规主要有两套：一套是欧洲 EURO 排放标准，另一套是由美国环境保护署（EPA）和加利福尼亚州空气资源委员会（CARB）拟定的两个美国标准。

欧洲法规定义了六个排放级别（欧 1、欧 2 等），更高的级别代表更严格的最大排放限度。每一个欧洲标准对应着一个日期，该日期是所有新注册的车辆都法定要求达到该排放限度的时间。每个标准的限度随着燃油种类（汽油/柴油）和汽车类别（乘用车、轻型商用车等）的不同而各有区别。以搭载汽油发动机的乘用车为例，如图 15-2 所示，每个标准的要求逐级递增。

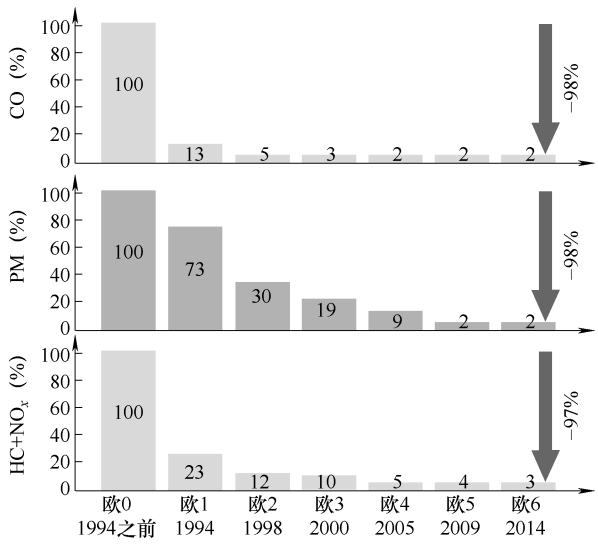


图 15-2　各阶段欧洲标准对应的排放要求

在德国，必须在汽车风窗玻璃处张贴代表在颗粒物排放方面所达到的相应标准的贴纸（图 15-3）。颗粒物排放等级为 1 的汽车（如未装配催化剂转换装置的汽油发动机汽车）没有贴纸。一些城市已经拒绝低颗粒物排放标准的汽车进入它们的市中心。图 15-3 是在所谓的环保区域入口处标示的相应交通标志和允许的颗粒物排放水平。

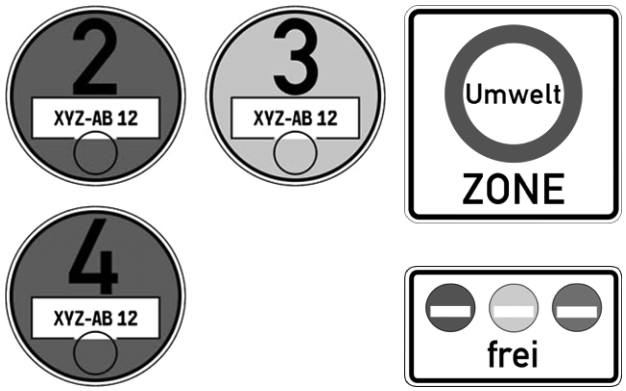


图 15-3　德国风窗玻璃 PM 贴纸和环保区域交通标志

2014 年 3 月 6 日，欧盟终于痛下决心，将汽车 CO_2 排放列为强制标准：将所有新乘用车的最大平均 CO_2 排放限制在 120g/km。欧洲标准同样被其他主流市场所采用，如中国、印度和俄罗斯。

美国是世界上最早执行排放法规的国家，也是排放控制指标种类最多、排放法规最严格的国家。美国的汽车排放法规分为联邦排放法规，即环境保护署（EPA）排放法规和加利福尼亚州空气资源委员会（CARB）排放法规。美国加州最早控制汽车排放，而且标准也最

严。联邦排放法规落后于加利福尼亚州排放法规 1 ~ 2 年。

所有在加利福尼亚销售，或者在称为 CARB 的州（缅因州、马萨诸塞州、纽约州、佛蒙特州）以及加拿大销售的新车必须根据 CARB 法规获取销售资格。在目前的第二阶段中，定义了 6 个不同的排放级别（表 15-2）。汽车的排放级别标示在位于发动机盖下的车辆排放控制信息标签上。除了实际的最大排放等级，PZEV 和更高级别的标准则要求排放控制系统要保持长期的有效性。除了前面提到的那些州，其他州执行略微宽松的 EPA 标准。

表 15-2　CARB 第二阶段汽车排放评级

等　　级	要　　求
LEV Ⅱ级 （低排放车辆）	NO_x 排放量是 1999 年汽车排放（LEVI）的 25%
ULEV Ⅱ级 （超低排放车辆）	HC 和 CO 的排放量是 LEV Ⅱ的 50%
SULEV Ⅱ级 （极低排放车辆）	NO_x 排放量减少 90% 以及装配先进排放控制系统
PZEV 级（部分零排放车辆）	符合 SULEV 尾气排放标准，拥有 15 年/150000mile 的保修，并实现零蒸发排放
AT PZEV 级（先进 技术零排放车辆）	符合 SULEV 尾气排放标准，拥有 15 年/150000mile 的保修，并实现零蒸发排放，还包括混合动力之类的先进技术部件
ZEV 级 （零排放车辆）	零尾气排放，并比新款汽车平均排放水平低 90%

为了让潜在的消费者直观看到新车的燃油消耗评级并做出比较，从 2015 年以来，美国强制推行 EPA 燃油经济性标签（图 15-4）。考虑到汽车加剧了空气污染，加利福尼亚州还将推行环保表现标签，如图 15-5 所示。从车型年份 2009 年开始，汽车必须贴上表示汽车涉及全球变暖和烟雾指数的标贴。

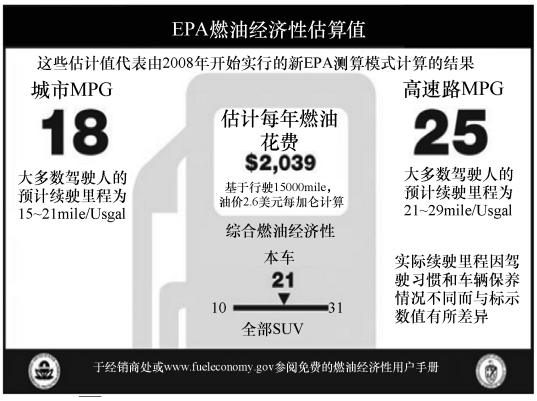


图 15-4　EPA 燃油经济性标签

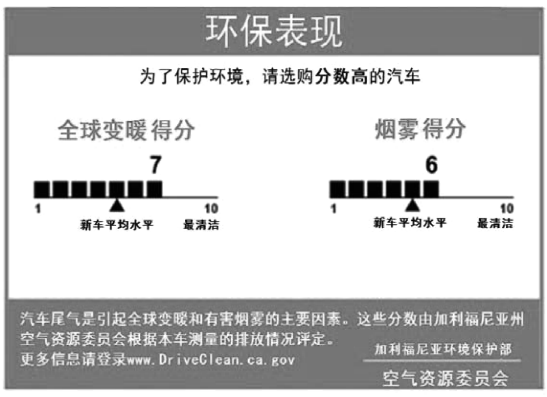


图 15-5　CARB 环保标签

3. 燃油品质（其他要求）

除了限定排放，欧洲和美国的标准还要求配备车载诊断系统，该系统检测和确保减少排放废弃物的功能，如对催化剂转换、废气再循环或蒸发排放控制系统等进行监控，以确保其正常运行。这些标准还对燃油品质制定了要求，特别是对于硫含量的限制。

4. 未来法规要求

与其他整车特性不同，汽车排放相关的法规在技术和经济上对汽车制造商造成巨大的挑战。为了能进行长远满足法律要求所需的研发工作，汽车制造商需要非常准确地预测未来实施的法规。图 15-6 是美国、加拿大、欧盟和日本已通过的有关汽车排放的法规以及未来发展趋势预测。

图 15-6　全球关于机动车排放的现行法规及未来发展趋势

15.2.2　尾气排放和能耗测试方法

能量的消耗和尾气排放在很大程度上取决于汽车是在市区道路、乡村道路还是在州际道路上行驶，以及驾驶人的实际驾驶习惯。为了能得到可供比较的数值，特别是在排放测试中，汽车将依照标准化驾驶循环行驶，该循环规定了一定时间内特定的速度变化情况。

驾驶循环可以是模态的，也可以是瞬态的。模态循环（被欧洲和日本选用）是一种包含许多人工干预的循环，由直线加速、直线减速和匀速行驶组成各个独立的阶段，各阶段可以简单地换算。瞬态循环（美国选用）源于真实的驾驶工况，因此比模态循环更能代表真实的驾驶行为。

在欧洲，最重要的驾驶循环是新欧洲驾驶循环（NEDC）（图 15-7），也称为欧

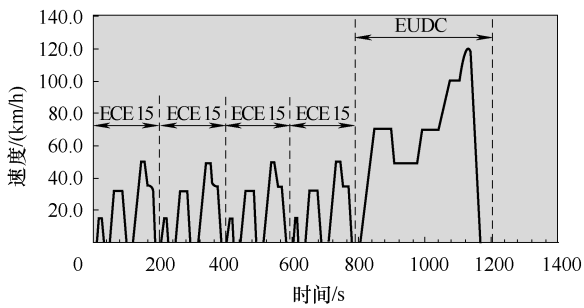


图 15-7　新欧洲驾驶循环（NEDC）

洲经济委员会（ECE）循环。根据 150/220/欧洲经济共同体（EEC）条令的详细规定，该循环包含一系列由四个 ECE15 城市中最高车速为 50km/h 的加减速循环和一个最高车速为 120km/h 的 EUDC 陆地循环组成的驾驶循环。新欧洲驾驶循环（NEDC）有 11km 长，完成一次循环需要 20min。

针对模态驾驶循环在评价混合动力汽车时表现出来的不足，作为一个欧洲联合研究项目，人们开发了瞬态 HYZEM 循环（图 15-8）。HYZEM 循环由三部分组成：600s 的城市道路、800s 的郊区道路和 1806s 的高速公路。

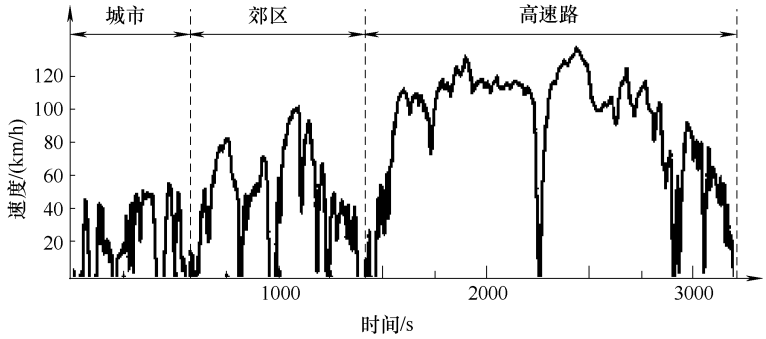


图 15-8　瞬态 HYZEM 驾驶循环

在美国，环保署已经定义了四种不同的驾驶循环：FTP155 循环（图 15-9）模拟在低速、频繁起停的城市交通环境中驾驶的工况（也用于冷温测试）；高速路燃油经济性循环模拟在畅通的交通环境中高速行驶的工况；美国 06 补充协议循环（所谓“剧烈驾驶循环”）模拟发动机高负荷运转的工况；SC03 速度校正循环，用于包括在炎热外界环境中使用空调在内的测试。

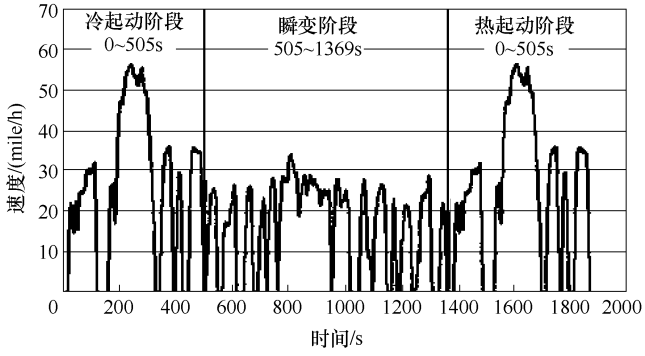


图 15-9　FTP155 循环

而日本则建立了两种类型的驾驶循环：10 型循环是持续 135s 的最高车速为 40km/h 的城市驾驶循环；15 型循环是持续 220s 的最高车速为 150km/h 的城市和郊区驾驶的混合循环。10-15 型循环则是由一个 15 型循环、三个 10 型循环以及一个 15 型循环组成的循环序列。

图 15-10 针对世界各地平均速度和相应的正加速度对上述各种驾驶循环做了一个比较。

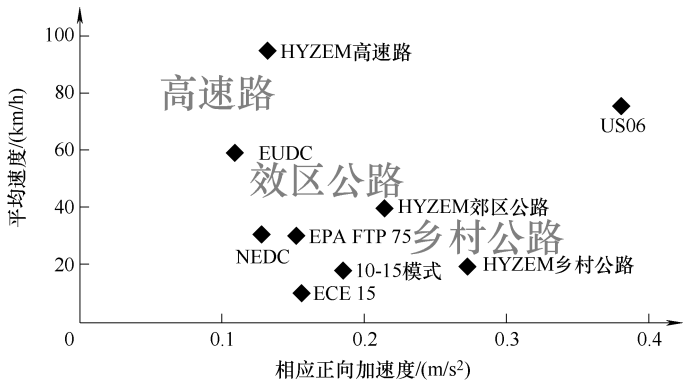


图 15-10　世界各地驾驶循环比较

排放和能耗测试则在测试台上进行，汽车在测试台上要以严格遵循相应驾驶循环的行驶模式运转（图 15-11）。

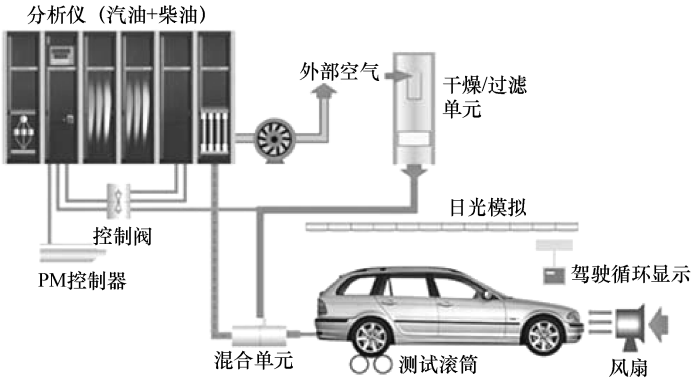


图 15-11　测试台上的排放测试

为了使结果尽可能精确，必须将被测汽车和测试环境限制在严格控制的特定条件下（如环境温度、发动机温度、蓄电池电量、油箱油量、辅助通风温度和空气流动状况等）。在相应的驾驶循环结束后，测试人员收集尾气，与洁净的外界空气混合并进行分析。

15.3　汽车挥发性排放物测定

15.3.1　相关法规要求

除了燃烧过程（或者其他将能量转化为推进动力的方式）中产生的副产物，汽车还会向车舱和外界环境释放挥发性有机化合物（VOCs）——即使发动机处于关闭状态。这种有机化合物主要来自燃油系统和塑料部件的挥发物。

在汽车所造成的所有碳氢化合物污染中，来自燃油系统（油箱、输油管、化油器）或加油过程中蒸发（挥发）的燃油占了主要部分。特别是在环境温度较高时，蒸发（挥发）的碳氢化合物质量可能超过尾气排放的碳氢化合物总量。三种挥发性燃油泄漏形式如下：

- 日常性挥发：由于环境温度的升高而造成的燃油挥发。
- 热浸损失：在汽车使用过程中，由发动机热排放造成燃油的瞬间挥发。
- 运行过程泄漏：汽车运行时的燃油挥发（所谓的“曲轴箱排放”）。

非燃油挥发性排放（也叫做静止泄漏）主要包含来自汽车内部和外部塑料部件（特别是软化剂和溶剂）的挥发性有机化合物，非燃料液体（如润滑油、制动液或风窗玻璃洗刷液）或粘合剂的排放。由于挥发性有机化合物随着发光塑料件的表面积增加而增加，泡沫材料极其重要。

近几年来，关于机动车挥发排放限制的法律法规已经大大加严了。1993 年的联合国欧洲经济委员会（UNECE）R34/欧Ⅰ条规允许在 24h 内有 20g 的挥发排放，而自 2015 年以来施行的欧Ⅳ条规却规定在同样时间段内的挥发排放不应该超过 2g。自 2009 年施行的欧Ⅴ标准，规定在同样时间段内的挥发排放物不得超过 2g，但是如果燃料含 5% 乙醇并因此具有更高的蒸气压力，那么关于这种燃料的限制也将会更加严格。在美国，加州空气资源协会Ⅱ（CARB LEV Ⅱ）规定汽车允许每天有最大 500mg 的排放量（表 15-2），而部分零排放车辆（PZEV）只允许有 350mg 的排放量，其中来自燃油系统的排放最多可达 54mg。考虑到一辆普通的乘用车重约 1.6t，约有 8000 个塑料部件，300mg 的非燃油挥发性排放目标几乎难以达到。

15.3.2 挥发性排放物分类

1. 燃油挥发

如今，通过把来自燃油系统的挥发燃油收集并存储在炭罐中的挥发控制系统，可以将进入大气的燃料挥发量（源于日常泄漏、热浸损失和运行泄漏）控制在最小值。在发动机起动的瞬间，存储在炭罐中的气态燃油被吸出，经过净化阀后供给发动机，成为可燃混合气的一部分燃烧掉。除了储气罐和净化阀，整车布局中还必须为油箱提供安放空间，油箱不但要求燃油蒸气不能渗透，还要具备收集燃油气体的额外容积。和其他减少排放的措施一样，法规要求可以长期保证这种燃油挥发控制系统的有效性。

燃油的蒸发特性在很大程度上取决于燃油的蒸发压力。为了使燃油蒸发量最小化，燃料的蒸发压力必须尽可能低；另外，为保证安全的冷起动，蒸发压力又必须足够高。因此，炼油厂要根据一年中的气候条件来调整燃料的蒸气压力。

2. 非燃油挥发性排放

如今，在一辆豪华汽车中，大约 50% 的非燃料挥发性排放（静止泄漏）源自底盘部分（特别是轮胎），25% 来自汽车内外部的装饰，25% 来自发动机的塑料部件。近几年来，得益于像聚甲醛（POM）或聚对苯（PPP）之类的高分子聚合物的改良，来自塑料部件的碳氢化合物挥发量已经大幅度减少了。举个例子，10 年前，由 15 聚甲醛制造的塑料夹子也许会产生和整套汽车内饰等量的气体排放，而如今这种夹子本身产生的排放气体已几乎检测不到了。除了材料的改良，对于排放水平相对较高的部件（如座椅或地毯中的泡沫材料），可以通过覆盖较低排放材料的方法来加以隔绝。例如，在座椅的泡沫材料部分外面覆盖紧密的皮革或织物蒙套，可以将由泡沫材料挥发的碳氢化合物封装起来，防止其泄漏到环境中。

随着燃油蒸发量的显著减少，来自润滑油和其他汽车液体的排放已经成为当今人们关注的重点。炭罐、管道和加油口盖子的密封非常重要。从储存罐中泄漏的微量玻璃清洗液将立

即增加十倍的非燃油蒸发性排放量。

15.3.3　挥发性排放物测量与评估方法

欧盟（EURO）、美国环境保护局（EPA）和加利福尼亚空气资源委员会（CARB）制定的法规要求对来自整车的挥发性排放总量（日常泄漏、热浸损失、运行过程泄漏、静止泄漏）进行测量。尽管这些排放物是由互相独立的部件或液体产生的，但是总的挥发量与各个单独部件排放量的简单相加比较，却有很大的不同。产生这种现象的原因是不同子排放物质之间发生了化学反应，相互中和或者产生了额外的碳氢排放物，从而增加或减少了总的排放物。然而，这些基本的化学反应过程还尚未被人们完全掌握，正因为如此，有必要对整车的排放进行测量。

整车的蒸发排放是通过密室蒸发含量测定（SHED）试验来测量的，如欧盟（EU）98/69/EC/UNECE R83、加利福尼亚州空气资源委员会（CARB）和美国环境保护局（EPA）40 CFR 86.133-96 之类的条规对试验过程做出了详细的规定。在 SHED 试验中，汽车将在具有特定温度、湿度和空气流通状况的气密实验室中放置特定的一段时间（图 15-12）。

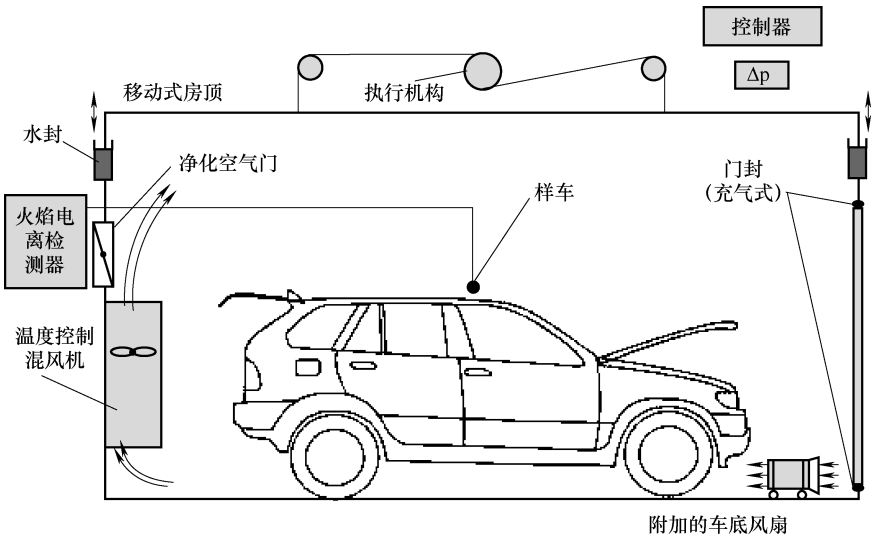


图 15-12　整车 SHED 测试室

试验结束后，研究人员通过火焰离子化检测器来测量试验过程中释放的碳氢化合物量。至于测量汽车运行时碳氢化合物释放量，是让汽车在测试室的台架上运行。此时，废气被引排到测试室以外，这样就可以对剩下的蒸发性排放进行测量了。

至于新零件的资格预审和问题分析方面，单独的部件和零件同样要接受 SHED 检测。用于部件测试的实验室要小得多（如 $1m^3$），并由像德国汽车工业协会（VDA）2156 号或美国汽车工程师协会（SAE）J115315 之类的规范详细规定各项技术参数。

评估和比较不同塑料蒸发特性的方法是，把相应的塑料样品密封在烧瓶中，暴露在 80～100℃的温度下一段时间，然后对收集的气体（所谓的“顶端空间”）进行静态（VDA 21515）或动态（VDA2158）分析。

15.4 汽车降噪设计

15.4.1 相关法规及客户要求

运动型汽车的消费者认为拥有强劲动力的发动机或汽车发出的声音很美妙（甚至可能通过特殊排气管来把声音放大），而通常公众就把它视为纯噪声。很明显噪声对人（以及动物）在心理上和生理上产生不利影响，来自于公路、铁路和航空的交通噪声已经成为噪声污染的最大来源。以下三个决定性因素构成了机动交通的全部噪声污染源：

- 车辆：发动机、排气系统、轮胎、空气动力学（参见 10.3 节）。
- 交通参数：车流密度、最高车速、交通流量的稳定性。
- 道路：路面状况、道路规划、路面升降。

现在关于外部噪声的法律要求只涵盖了“汽车加速通过噪声”，因此主要限制了排气系统的噪声等级。自 1995 年来，联合国欧洲经济委员会（UNECE）第 51 条要求客车的最大汽车通过噪声不得超过 74dB，根据 J1470 ISO 362（与美国汽车工程师协会 J1470 条例相同）测量所得。然而当汽车匀速行驶时，轮胎和路面间产生的噪声有 70% 来自“声压”，远超过来自传动系统、排气系统或排气筒产生的噪声。在欧洲，行驶噪声可由欧盟（EU）2001/43/EG 条规限制，并根据 ISO 13325 测量。

特别对于高档轿车，消费者希望他们的汽车声音排放低于法定要求，制造商做了重大努力以降低噪声。但是，噪声很低的汽车对于其他交通参与者存在一定的安全风险：如电动汽车在低速行驶时发出的声音几乎无法被听到，这些交通工具经常要冒无法被行人和骑自行车者发现的风险。

注：声压（sound pressure）是指有声波时，媒质中的压力与静压力的差值。表示声压的量值可能有瞬时值、平均值、有效值、最大值或峰值等。

15.4.2 降噪设计措施

车辆外部噪声对于典型的郊区交通尤其重要，典型的郊区交通的特征有车流量大、频繁的加速和减速以及车辆降低到中等速度行驶。通常，减少由机动交通产生的噪声的措施包括：

- 减少噪声排放的措施（涉及汽车的技术特点、路面的特点、交通流量和交通流动速度）。
- 抑制噪声传播的措施。

从汽车设计的角度看，噪声的消除与产生外部噪声的部件有关（图 15-13）：

- 消音系统的优化。
- 发动机和变速器的优化与封装。
- 轮胎的优化。

噪声减少的巨大潜能（尽管这不是

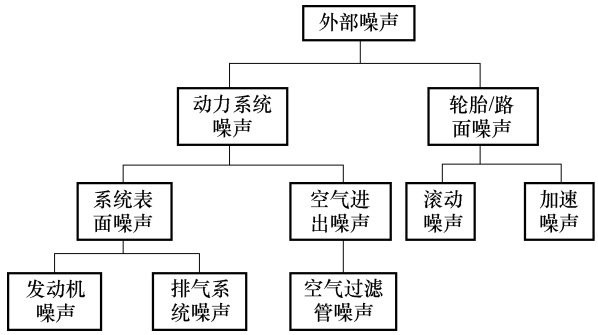


图 15-13 外部噪声的来源

汽车制造商的责任）取决于一个良好的交通环境：措施包括路面设计（与轮胎设计一起）来优化由郊区交通引起的噪声污染来源，优化市中心交通流量控制系统来减少汽车加速和减速的需求，以及优化噪声吸收障碍。

15.4.3　噪声测试方法与标准

用于测量外部车辆噪声最重要的国际测试标准是根据 ISO 362（与 SAE J1470 相同）制定的“通过噪声测试”。在测试中，车辆噪声通过两个传声器，一边各一个的配置方法来测量（图 15-14）。测试中的汽车以 50km/h 的速度驶入测试道路。在传声器前 10m 测试车辆加速行进，直到汽车尾部离开传声器 10m。驾驶人通常使用特殊工具帮助他们选择正确的档位和进入速度。

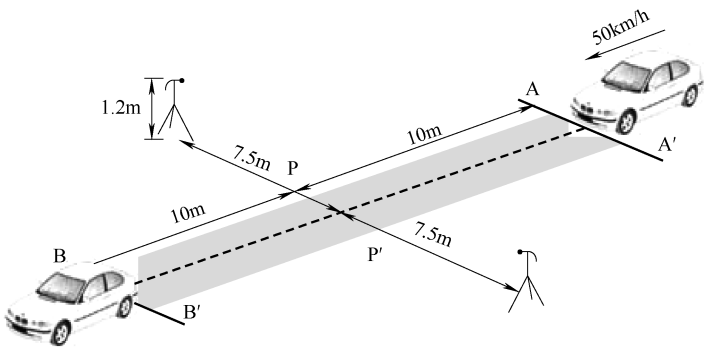


图 15-14　ISO 362 噪声通过测试

为了从轮胎和路面噪声中区分发动机和排气系统噪声，ISO 362 标准规定了相关测试可以在测功机上进行。这种设置需要在半挂式场地上有 36 对传声器。图 15-15 展示了这种噪声测试台架，其另一优点是使得试验能设定在标准气候条件下进行。

其他与汽车噪声排放有关的标准试验程序有 ISO 13325 的轮胎噪声测试和 ISO 5130 的排气系统噪声测试。

图 15-15　汽车噪声测试台架

15.5　汽车抗电磁辐射设计

15.5.1　相关法规要求

尽管装载电磁设备的汽车产生的电磁辐射不是最主要的环境污染问题，但汽车制造商必须满足电磁兼容性的有关法规要求。

考虑到汽车的电磁辐射，消费者通常不希望汽车电磁辐射超过法律要求。世界范围内，对于电磁排放的法律限制由联合国欧洲经济委员会（UNECE）管理条例 10 制定（由

EU152/245/EEC，2004/104/EU 版本实施），此要求是关于在 30～1000MHz 频段间的宽频和窄频测量。

15.5.2 抗电磁辐射设计措施

通常，电磁辐射的减少是由同样适用于获得电磁抗扰度所需要的设计措施实现的。这些措施将在第 16 章中再详细讨论。

15.5.3 测试方法与标准

由于没有官方标准来完整定义电磁兼容性（EMC）试验程序，原始设备生产商（OEMs）通常把他们自己的标准带入实施过程中。如宝马集团标准 GS 95002 包括四种类型的关于部件和整车的电磁辐射测试程序规格：

- 电流测量，包括脉冲宽度、频率和时钟信号转换率的测量。
- 根据 ISO 156315-3 使用耦合放大器电容的测量。与 ISO 156315-3 标准对照，这一耦合放大器是用来记录发射出去的电场的。
- 使用电流探头和测量接收机的电感的测量。
- 使用电介质带状线（来自 ISO 11552-5 标准）或消声室的天线（根据 CISPR25 标准）的耦合场测量。

第16章

新车可靠性试验与验证

16.1 概述

汽车的可靠性是指在规定的使用条件下和规定的行程内完成规定功能的能力。汽车的使用可靠性取决于汽车本身的固有可靠性以及汽车的使用维修水平，并与汽车的使用条件有关。汽车使用时间增长，其出现故障的可能性随之增大，使用可靠性下降。若从汽车开始运行到其工作至 T 时开始对汽车实施维护，则称时间 T 为维护周期。在达到维护周期之前，汽车出现故障的可能性增大，经维护后，使汽车的技术性能在一定程度上得到恢复。汽车经过长期使用、多次维护后，其技术性能会明显下降，这时只有通过修理才能使技术性能有大幅度的提高。当汽车使用到其性能达到极限状态时，相应达到汽车极限行驶里程。可见，汽车维修只能在一定程度上维持汽车的技术状况，提高使用可靠性，但不能完全恢复其固有可靠性水平。故经过相当里程的行驶（即达到极限里程）后汽车就报废。

16.1.1 可靠性定义

可靠性是评价汽车技术水平的综合性使用性能的指标。通常，可靠性定义为产品在规定的时间和规定的条件下，完成预定功能的能力或概率。这个度量指标通常用于详细说明技术系统的可靠性需求，如车辆的平均故障间隔时间（MTBF）或其倒数值、恒定失效概率（CFR）。对于乘用车，平均故障间隔时间通常是指行驶的里程数。

对于所谓的单发射系统如安全气囊等，正常操作下保持收起状态，并且只需操作一次，故给出平均故障间隔时间或失效概率是没有意义的。在这种情况下，可靠性是由系统成功的概率来衡量的。

可靠性数值如平均故障间隔时间（MTBF）是很有意义的，而可靠性数值依赖于之前定义的“给定条件”的真实程度。可靠性工程的一大挑战就是预测汽车使用的方式，并将这种假定作为设计和衡量过程的基础，例如：

- 机械和热负荷模式：车辆常常是谨慎驾驶还是鲁莽驾驶？路面平滑还是粗糙？它是用于短程驾驶还是长途驾驶？它通常满载行驶还是只有驾驶人作为额外的负载？
- 环境模式：车辆是行驶在干燥、炎热或尘土飞扬的市区中，或在潮湿、寒冷的盐碱道路，还是在一个适宜的气候环境中？
- 操作模式：哪些功能被驾驶人（或乘客）使用？哪些功能驾驶人和乘客同时需要使用？驾驶人和乘客如何使用这些功能？

相比于上面给出的可靠性一般定义，潜在乘用车客户对于她（他）的车辆可靠性，通常会有一个更为具体的概念，例如：

- 汽车多长时间会发生故障并需要拖车修理?
- 我必须多长时间开车到经销商那里进行汽车修理?
- 我必须多长时间开车到经销商那里进行临时保养?

16.1.2 失效严重性

除了上述适用性，可靠性的另一面是失效的严重性。它总结了一个特定的失效可能导致的后果。表 16-1 引入了一个“测量”严重程度的度量方法。

表 16-1 失效严重性等级（来源：宝马）

严重性等级	结　论
5	在接下来的机会中可以修复
4	需要到 4S 店修理
3	故障，车辆需要被拖走
2	缺少强制性属性（汽车成为非法的）
1	车辆造成驾驶人生命威胁或环境风险

16.1.3 可靠性与质量

产品质量可以看作是对客户需求的满意程度，连同它们各自的流程，已经在 7.5.1 节讨论过了。然而对于整车而言，另一个重要要求便是可靠性，它是车辆整个寿命周期中一个需要持续满足的要求。

尽管潜在客户在考虑购买二手车时，首先想到的是可靠性，但是整车层次的可靠性几乎很少在有关汽车开发的书籍中提到，这种现象可能的原因有两个。首先，可靠性显然对于新车买家来说并不是那么重要，这些买家往往是整车开发的关注群体。其次，近几年技术模式上发生的结构性变化造成了车辆部件、系统以及整车故障，以前整车可靠性主要由其部件（如车身、发动机、变速器）的可靠性决定，而目前车主经历的可靠性问题大多数是由软件控制系统的误操作引起的。德国汽车俱乐部（ADAC）的汽车故障分析清楚说明了这个问题（图 16-1）。

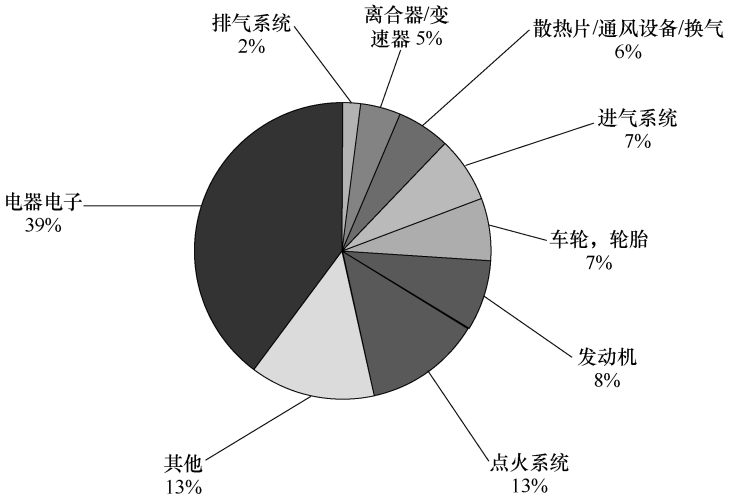


图 16-1 子系统造成的车辆故障（数据来源：ADAC）

16.1.4　可靠性与成本

除了由缺乏可靠性给车主造成的风险和不便，它还代表了一个主要的成本因素，汽车可靠性成本如何影响总成本。这尤其适用于商业客户，如车队经理或汽车租赁机构，在那里汽车的可靠性直接影响业务的经济效益。汽车可靠性是极为重要的，平均故障间隔时间或恒定失效概率是他们的商业计划与合同的一部分。

但是缺乏可靠性不仅仅导致车主成本的增加，并且由于名声与客户满足度受损，还造成制造商所遭受的间接经济损失，汽车行业的保修成本每年超过 100 亿美元，超过产品收入的 2%。对于这样一个行业，每辆车的标准平均利润额为 175 美元，而每辆车保修成本为 700 美元，这意味着该行业的长期负债和极端的财政压力。然而对制造商来说更糟的是，当今市场要求的是更加长久且更全面的保修服务。

16.2　汽车失效模式分析

面向可靠性的设计意味着必须从一开始消除潜在的失效来源并且后期也要遵循，就像其他所有的整车特性，在 1.3.3 节中介绍的新车型开发流程模型：可靠性目标与整车一致，然后在部件层次上设计，并且在部件、子系统和系统层次上进行验证。这既需要不同类型零部件（嵌入式软件）的失效模式，又需要研究整个系统的可靠性，也就是要明确汽车零部件失效如何导致系统失效。

16.2.1　汽车零部件失效

在汽车行业，过去几年中决定车辆可靠性的因素已经发生变化：传统汽车失效，多源于车身与底盘部件的腐蚀和动力传动系统部件的磨损；而现代汽车可靠性大多与电子电器系统（E/E）的控制软件有关（见 6.2 节）。这对客户的影响可能是类似的，但潜在的因果关系链却是完全不同的，必须对其在一个详细的层次上进行理解。

负载相关的失效表示一个故障部件由于磨损、老化或过载，如压缩机轴的疲劳断裂导致空调系统失效，或者发动机电子控制单元中半导体失效导致发动机故障等。基于一个假定的载荷谱并乘以合适的安全系数，部件运行所能达到的工作强度可通过计算并被正式记录在部件的技术要求中。作为设计流程的一部分，所需工作强度是零件设计计算的基础，并会与如材料成本、可用空间及质量/转动惯量等其他目标发生冲突。

这种情形的一个很好的例子就是底盘部件的尺寸。每天正常使用的汽车与在专业跑道上赛跑的汽车的载荷谱有着很大的不同。但因为底盘部件是安全的关键，专业跑道的载荷谱是计算部件耐久性的基础，尽管日常的工作强度载荷谱要小得多。

考虑到这一过程，硬件部件的失效有两个基本原因：

- 实际载荷谱超过额定设计载荷：

设计的载荷谱与实际不符（如敞篷车车顶的假定开关频率太多）；

很多情况下，实际载荷超过设计载荷（例如，车辆快速越过路肩）。

- 该部件弱于预期的疲劳强度：

作为设计流程的一部分，对单一机械部件的疲劳行为可以使用有限元法（FEM）模拟。

以拉紧杆为例，图 16-2a 显示了数值模拟的结果，预测在经过 450 ~ 600 次负荷变化后，拉杆上端右下部的区域萌生早期裂纹。图 16-2b 显示的是实际拉紧杆经历了 292 次负荷变化之后测试到的初始裂纹。

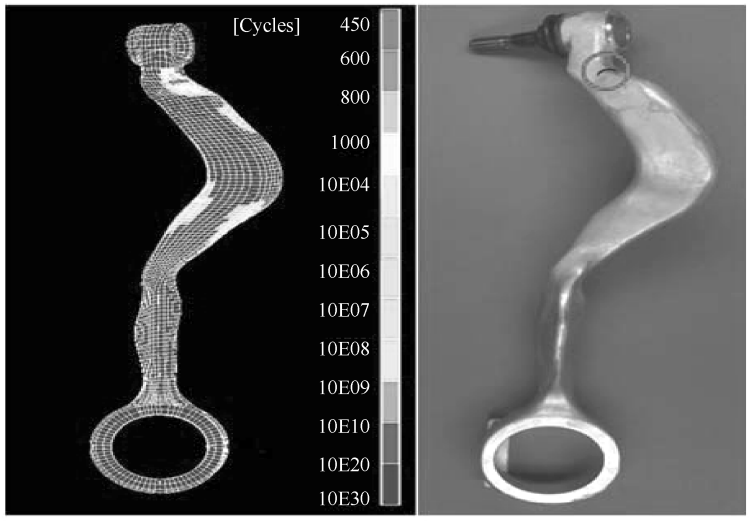


图 16-2　疲劳裂纹：模拟和实际测试结果（来源：宝马）

• 第一阶段为新系统的早期失效。通常是由产品成熟度不足或生产故障引起的。随着产品和流程的有关问题都得到了解决，系统也变得越来越成熟。随着产品已到客户手中，曲线早期的阶段可以被认为是新产品开发的最后阶段。车辆设计时考虑的质量议题越多，在交付前需要的测试也越多，相应地浴缸曲线的起点就会越低。一个已经建立且经过多年改善的成熟系统，实际上是没有早期失效阶段的。

• 第二阶段为系统寿命周期的主要部分。发生一些随机失效，但是失效概率尽可能低。第二阶段持续的时间应该尽可能长，通常至少与首个购买客户沿用该产品的时间一样长。

• 第三阶段为系统寿命的后期。磨损和疲劳失效导致失效概率越来越高。这个阶段应该发生在产品预期寿命结束之后。随着失效概率的增加，维修成本也会增加。当维修费用超过产品的实际价值时，产品就报废了。

随着测试时间的推移，传统机械系统或电气系统的失效率表现出一个独特的特征，它就是浴缸曲线（图 16-3）。主要分为三个阶段：

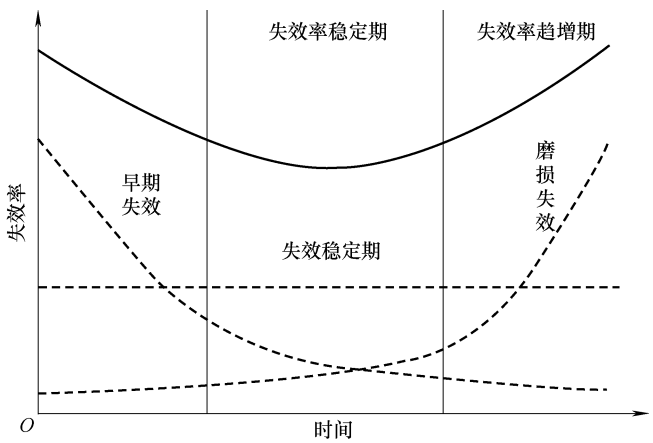


图 16-3　浴缸曲线：车辆使用寿命中的失效率

• 计算过程不正确（例如，

运用错误的模拟算法来计算零件尺寸)。

- 未按照有关技术要求来制造或装配部件（例如，在一个张力结构铸件内部气孔的数量超过了许用水平)。
- 在生产或运输期间，部件就有预损伤（例如，在车辆海运期间，停顿状态的轮毂轴承上有振荡应力)。

16.2.2　汽车电子器件失效

相对于机械部件，电子器件（如处理器、内存芯片或常见的半导体）显示了一个稍稍不同的失效模式。导致故障的三个主要因素是：

- 环境温度：在大多数情况下，导致微处理器失效的实际根源是冷却系统故障。
- 工作负载：微处理器的可靠度很大程度上取决于实际工作负载。
- 动力稳定性：大多数内存失效是供应电压变化导致的软故障引起的。

16.2.3　嵌入式软件失效

就可靠性而言，软件是遵循完全不同规则的系统。像乘用车这样复杂的机电系统，嵌入式软件对于系统可靠性已经成为决定性的因素。在大多数情况下，既不是机械部件如车身或发动机，也不是执行机构、传感器、导线或电子控制单元硬件导致整个系统失效，而是软件创造了一个多余的或是意料之外的系统状态而不是达成指定的功能，从而导致子系统或整车的故障（6.2 节)。

根据美国国家标准学会（ANSI)，软件可靠性被定义为在特定环境和特定时间下，软件操作的无故障概率。前面提到的硬件系统的可靠性度量标准——如平均故障间隔时间（MTBF）或恒定失效概率（CFR)，当应用于软件时，就没有很大意义了。软件可靠性有一个合适的度量标准，如故障密度（FD)，常以每 1000 行代码的故障数来衡量。表 16-2 给出了典型的目标值。

表 16-2　不同类型软件的可接受失效率（来源：卡内基梅隆大学）

软 件 类 型	失效率（每 1000 行代码）
正常软件	25
重要软件	2～3
医学软件	0.2
航天飞机软件	<0.1

软件失效是一种完全不同的失效形式。因为硬件失效是由物理或化学过程引起的，通过修理或更换有缺陷的部件就可以使整个系统恢复到初始工作状态来执行其预定的功能。然而软件不会老化或磨损。软件失效（即无意识的操作执行）是操作状态与输入信号意料之外地结合所产生的结果，而且总是与设计相关。相对于大多数的硬件故障，软件故障总是在没有任何预警之下发生的。典型的软件失效原因如下：

- 错误的或被曲解的软件技术要求。
- 编写代码时粗心或不熟练。
- 软件测试不充分。

- 不正确或意料不到地使用软件。

由于（即使在不算太复杂的程序）可能的输入/状态组合的数目可能会非常高且测试非常耗时，遵循系统的软件开发流程是软件可靠性工程的一个必不可少的原则。

随着时间的推移，软件失效概率遵循着一种不同于硬件失效的模式。更新后软件可靠性浴缸曲线如图 16-4 所示，它说明在有效寿命阶段、更新（改进）软件短期内提高了失效率，之后中长期失效率趋于稳定，意味着它不受老化或磨损的影响。

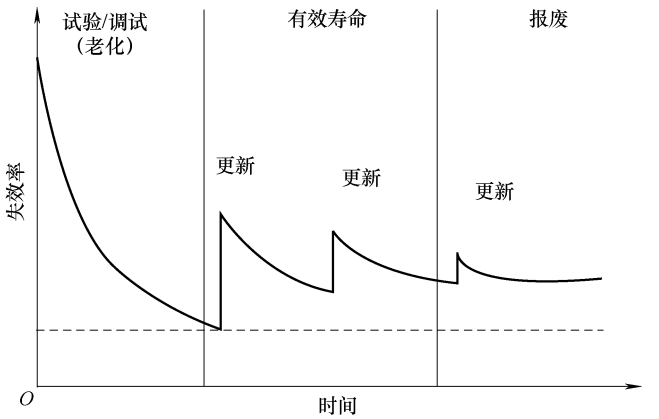


图 16-4　改进后的软件可靠性浴缸曲线（来源：卡内基梅隆大学）

创建可靠软件的第一步是用一种结构化的方法详细规定程序所期望的功能（详见 6.5.2 节）。经典的随机软件可靠性模型用于构建软件失效过程，能够估计当前的可靠性和预测未来的失效形式。基于需求陈述的词汇分析，定量地评价可靠性的尺度，包括累计文本行数、祈使句、续篇、指令、委婉语、不完整表述以及选择句等。

根据有关技术要求，软件设计决定了程序应该如何满足规定的功能。一个具有优良结构的高水准设计流程规定了其体系构架是与编码过程无关的，并且是开发可靠软件不可或缺的先决条件。在这个阶段，体系构架的容积空间和复杂程度是可靠性的两个主要度量指标。

实际编程是用高级编程语言编写的，对于汽车的应用来说，通常是用 C 代码分析方法来产生量化程序可靠性的度量标准。从可靠性角度来看，一个重要的编程要求就是在有效寿命周期内（图 16-4），在避免产生额外错误的前提下，确保程序可进行深层开发。

16.3　整车系统可靠性设计

整车的可靠性取决于它的子系统的可靠性，而子系统的可靠性取决于其零部件的可靠性。然而这个因果关系并不是唯一的：系统的复杂性和由此潜在的不可靠性的根源在于其部件与系统会互相影响各自的特性。例如，发动机热管理的失效会引起发动机舱的升温，从而导致发动机控制器的失效。

在系统层面，可靠性设计始于可靠性模型的创建，该模型代表子系统与零部件失效方式之间的逻辑相关性。这些模型是应用可靠性方法的基础。

16.3.1　汽车可靠性风险评估

汽车开发过程中，对于自下而上的风险评估最常见的归纳方法是失效模式及其影响分析（FMEA）。对于一个子系统或部件，失效模式和影响分析列出了所有可能发生的失效形式，然后评估每一个失效形式的后果（影响）。在一个广义的失效模式及其影响分析（FMEA）中，所谓的失效模式及其影响和危害性临界分析（FMECA），就是对所列出的各种失效模式根据对系统和零部件可操作性的危险程度进行排列。

为了确保失效模式及其影响分析（FMEA）、失效模式及其影响和危害性临界分析（FMECA）的风险评估的质量和一致性，不同行业已经开发了数量可观的标准，特别是在航空、航天和核能等行业。在汽车行业中，SAE J1739、IEC 60812、BS 5760 和 VDA 96 等标准已经实施。表 16-3 显示了某系统的失效模式及其影响分析（FMEA）表，它是根据 Relex 可靠性工作平台软件 FMEA/FMECA 模块创建的。

表 16-3　系统失效模式和影响分析表（FMEA）（来源：Relex）

项目/功能	潜在失效模式	潜在失效影响	SEV	种类	潜在起因/失效机理	当前设计控制	Detec	R. P. N.	推荐措施	责任与目标完成人
车辆停用或不能运行	泊车时发动机熄火	报废车堵在路上	10	YC	①微机故障；②助力转向压力开关故障	显示	4	80	实施限制操作策略	拉马·卡尔森
	发动机熄火	车辆停用	10	YC	微机故障	显示	4	80	实施限制操作策略	拉马·卡尔森
	发动机不稳定	不能运行	8	YS	HEGO 传感器损坏	回到低速模式	3	72	无	因格·斯蒂文森
	空调低怠速	发动机工作粗糙	6	YS	空档开关故障	显示	3	54		因格·斯蒂文森
	发动机不起动	不能运行	5	YS	排气门	显示	3	30	实施限制操作策略	苏尼尔
	发动机嘎嘎声	用户讨厌	2		油品质量或供应	无	2	16	检查燃油系统	拉马·卡尔森

除了表格和通用程序，FMEA/FMECA 标准提供了对风险因素定量评估的说明与推荐值。表 16-4 为严重性、发生概率及检测概率提供了等级划分的依据。

表 16-4　产品 FMEA 评级准则（来源：VDA）

严重性评级 S		发生概率评级 O		故障比例（10^{-6}）	检测概率评级 D		检测过程确定性
10 9	非常高 安全风险，不遵守法律法规，抛锚	10 9	非常高 故障发生非常频繁，不能使用，设计概念不当	500000 100000	10 9	非常轻微 已经发生的故障不可能被检测，设计可靠性也难以验证，检测方法是不确定的	90%

（续）

严重性评级 S		发生概率评级 O		故障比例（10^{-6}）	检测概率评级 D		检测过程确定性
8 7	高 车辆可操作性受严重限制，必须马上去维修店，主要操作和舒适系统功能降级	8 7	高 重复发生故障，有问题的，设计概念不成熟	500000 100000	8 7	轻微 已经发生的故障不太可能被检测，设计可靠性很可能难以验证，检测方法是不确定的	98%
6 5 4	中 车辆的操作性受限制，但不需要马上去维修店，主要操作和舒适系统功能降级	6 5 4	中 偶然发生故障，适合的设计并有相适应的成熟设计概念	5000 1000 500	6 5 4	中 已经发生的故障很可能被检测，设计可靠性可能被验证，检测方法是相对确定的	99.7%
3 2	轻微 轻微的车辆功能减弱，拟定去维修店，主要操作和舒适系统功能降级	3 2	轻微 偶发故障很轻微，验证了设计	100 50	3 2	高 已经发生的故障非常可能被检测，若干独立的检测方法被确认	99.9%
1	非常轻微 非常轻微的车辆功能减弱，仅需专家检测	2 1	非常轻微 几乎不可能发生故障	1	1	非常高 已经发生的故障原因被确定可检测	99.9%

显然，失效模式及其影响分析（FMEA）的价值很大程度上取决于团队是否考虑到了所有可能的失效模式，甚至是那些根本不可思议的失效模式。作为前面提及的软件工具的一部分，失效模式库为预测目标部件的失效模式，提供了创建性流程与方法。

失效模式及影响分析（FMEA）或失效模式影响和危害性分析（FMECA）对系统的分析是自下向上的，而故障树分析（FTA）方法是将一个系统不希望得到的状态分解成更低层次事件的布尔运算（Boolean）组合。通过应用从这些更低层次事件的评估或历史数据获得的可靠性数据，就可预测系统层次的可靠性。虽然不一定是绝对准确的，但这些预测可从可靠性角度对不同设计备选方案进行比较。

故障树分析方法的开发主要发生在航空航天领域，源于阐明一些导致灾难性系统失效境况的需要，如1986年“挑战者”号航天飞机的灾难性爆炸。美国国家航空航天局（NASA）发行的《故障树手册》对故障树分析进行了最全面的描述。总之，这个故障树分析方法在标准IEC 61025中也有详细说明。图16-5显示了一个“发动机意外点火”事件的故障树案例。

为复杂系统创建失效模式及影响分析（FMEA）、失效模式影响及危险性分析（FMECA）和故障树分析（FTA）是一项综合性的任务，这需要合适的项目管理和适当的信息技术支持。目前已经开发出相应的软件包，如APIS、Relex、Reliasoft Xfmea等可靠性分析软件。

改善车辆或其子系统可靠性的常用设计方法如下：

- 关键子系统的冗余度（如制动、灯等）。
- 子系统的解耦（例如，不扩展电子控制单元之间的功能传播）。
- 防错技术（Poka-Yoke）（产品或工艺流程的防呆设计）。

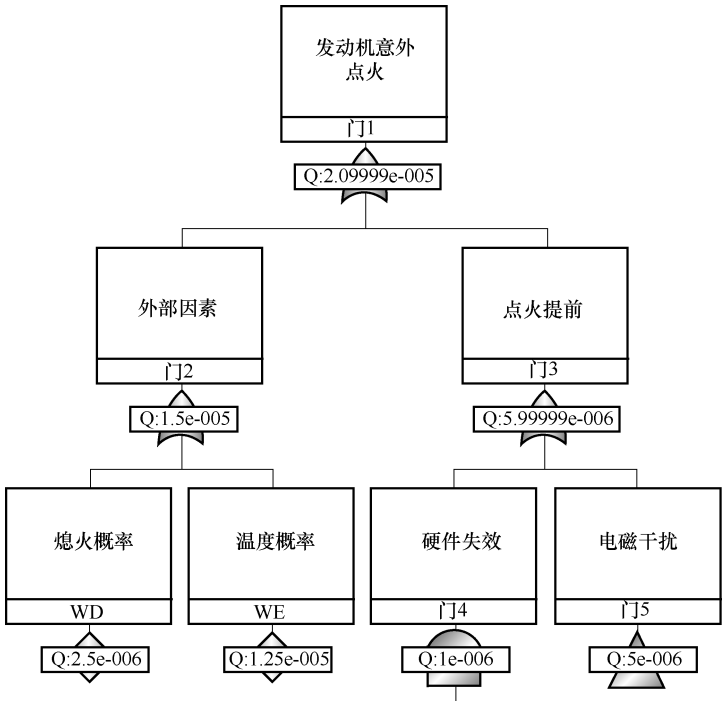


图 16-5　样品失效故障树分析

然而后者并不是在车辆操作系统设计中，而是在避免制造故障中扮演了最重要的角色，以免导致车辆故障。

如前所述，制造缺陷代表了引起车辆故障的另一半原因，例如，铸造型腔的缺陷、螺栓没有足够预紧以达到所需力矩，或胶接接触表面未按技术要求进行清洁，从而导致稳定性降低，并引起相关部件的失效等。

16.3.2　抗电磁干扰性能

一个独立的失效类别体系是由意外的或周围电磁场引起的。在电磁兼容性（EMC）术语中包含两个方面，抗电磁干扰是车辆可靠性相关的一个方面（其他方面详见 15.5 节）。电磁兼容性（EMC）相关失效案例有：

- 风窗玻璃的刮水器可以在收音机中“听到”；
- 当前照灯打开时，某调频电台不能接收到；
- 在高压电力线下驾驶车辆时，汽车发动机误点火；
- 当操作一个安装于行李箱的无线电发射器时，造成汽车抛锚与发动机控制器损坏；
- 当插入起动钥匙时发生静电放电，破坏点火电路；
- 附近的雷击导致巡航控制启动并加速。

通过对电磁兼容性（EMC）相关问题的分析，得出三种主要失效模式：

- 音频和视频信号的干扰。
- 高压电脉冲的诱导造成电子元件的损坏。
- 电缆和电子模块产生的电压脉冲导致的无用和不可预料的操作，被电子控制单元

（ECU）误解为一个输入信号。

现代轿车拥有大约 70 个高度相互关联的电子控制单元，多达 500 个传感器和执行单元，电线长约 3m，点火脉冲高达 40kV，还有大约 15 个内部天线，以用来探测毫伏级别的电压，其频率介于 125kHz 和 2.8 GHz 之间。因此它们对电磁扰动非常敏感。一般来说，电磁场强度越高，汽车的潜在风险就越大。

无用的电磁场源是车辆和车辆环境的一部分。因此通过汽车的电磁场内部源有：

- 高功率电流（如发动机控制器）产生的脉冲。
- 乘客的静电释放。
- 用户安装的无线电发射器。
- 电源开关。

从汽车设计师的角度来看，外部电磁场影响通常是能被他们接受的，从设计角度只关注对电磁干扰的抗扰性就可以了。电磁场的外部来源主要是：

- 其他车辆的电磁辐射（参见内部来源）。
- 广播和电视网络。
- 高压电线。
- 闪电。

电磁兼容性设计是一个自下而上的过程。首先，必须优化单一的集成电路，如微控制器芯片和总线驱动器（如汽车 CAN 总线的收发器）。其次，研究全部的电子控制单元。图 16-6 所示为根据 ISO 11452-5 标准，对一个伴有相关线束段的电子控制单元进行带状线抗干扰试验。

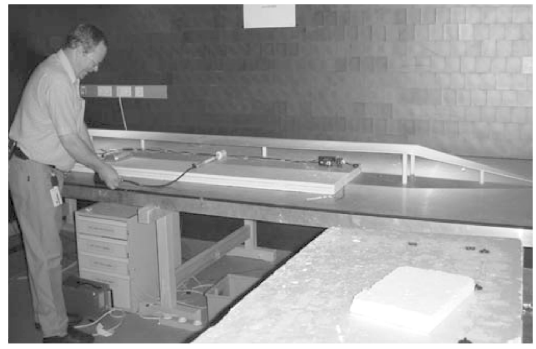


图 16-6　依据 ISO 11452-5 标准的带状线抗干扰试验

带状线抗干扰试验是与测试音频设备相关的，例如，从手机的全球移动通信系统（GSM）调制的干扰。在电子控制单元引起的干扰方面，调频频率范围是研究人员最感兴趣的。印制电路板和微控制器的模型允许控制器辐射方式进行足够精度的早期仿真。图 16-7 比较了仿真结果与实际电子控制单元测试的结果。

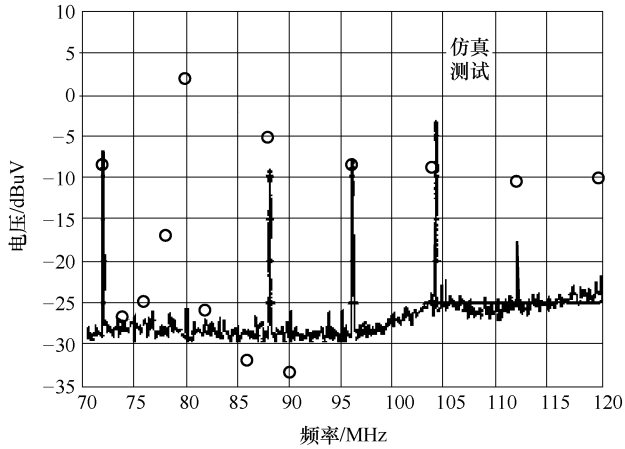


图 16-7　电子控制单元仿真及测试的比较（来源：宝马）

提高设备抗电磁干扰能力的一般措施是使用屏蔽的外壳和线、接地、通过滤波器（电阻、电容器、扼流圈）入口解耦。印制电路板电磁兼容性设计的最重要原则是：

- 使与高频功率和信号电流相关的回路最小化。
- 不能分离、隔离或者切断信号返回平面。

- 不在插接器之间定位高速电路。
- 控制信号转换次数。

16.4　汽车可靠性试验与评估

16.4.1　加速寿命试验

在整车可靠性测试中主要的困境是：若相关试验结果并入开发流程中，则必须在开发过程中预料整个系列的新车在其整个寿命周期过程中所展现出来的行为。而在这个阶段，新产品开发还未到系列产品设计的状态。为此，在开发过程中便引入了加速寿命（accelerated testing）试验方法。

汽车部件的潜在破坏因素就是在长期暴露环境中的影响。汽车部件和整车的标准环境试验，如根据 IEC 60068-2-11 标准的盐雾试验、根据 IEC 60068-2-60 标准的流动混合气体腐蚀试验、根据 IEC 60068-2-14 标准的温度变化试验、根据 DIN 75220 标准的光照模拟试验，使得汽车开发团队将长期的环境影响作用引入加速寿命试验中。例如，图 16-8 显示了仪表板零件在光照模拟试验之前（上）和之后（下）的情形，显示强烈的紫外线照射会出现明显的变形和褪色现象。

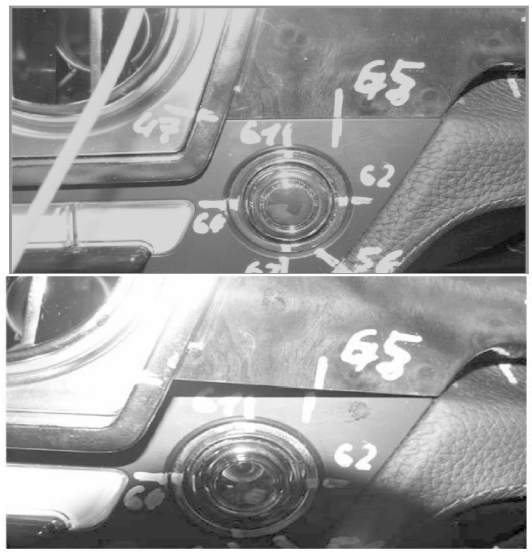


图 16-8　仪表板在光照模拟试验前后的状态

新车型的动态腐蚀试验就是整车腐蚀的全面加速试验项目的一个例子。这种强化的试验过程结合了对汽车的机械处理、热处理以及化学处理，分三步实施：

- 车辆准备：防腐涂层局部涂抹于空白金属上。
- 预处理：为了创建一个特定的预损坏程度，车辆被强置于极端的高热、机械及化学条件下，如在寒冷气候中扭转车身，模拟砂石、盐水及沙粒对汽车的冲击和行驶在起伏路、凹凸及障碍物上等。
- 腐蚀试验：实际的腐蚀试验需执行 50 次循环，每个测试循环需要 24h，并分为下列四个阶段：

阶段 1：汽车行驶通过潮湿和具有腐蚀性的环境气候。

阶段 2：盐水喷射。

阶段 3：在 45℃下冷凝。

阶段 4：存置。

该试验在三个月内对汽车造成的腐蚀状况，对应于正常行驶条件，一般在其寿命结束时才会出现。图 16-9 比较了后差速器在 50 天的动态腐蚀试验后（上）和正常行驶 7 年/20 万 km 后的情况（下）。

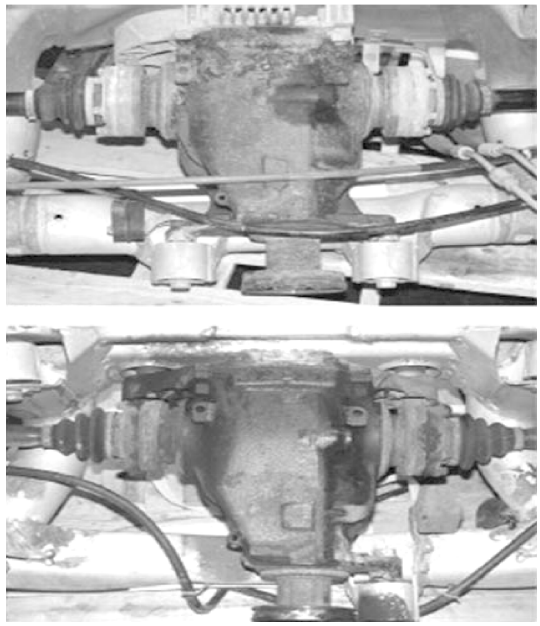


图 16-9　后差速器在动态腐蚀试验 50 天和正常行驶 7 年后的状态对比

16.4.2　可靠性模拟仿真

1. 疲劳强度

通过运用运动学和动力学模型，可以对整个系统中机械部件的受力情况进行模拟仿真。将装有负荷传感器的试验车辆，在测试路段路试中记录的真实应力数据，作为模拟过程中加载的依据。然后，依此创建的加载模式被用来作为仿真和硬件测试的初始输入数据。通过研究图 16-10 所示的虚拟车辆，可用于早期检测车辆在工作载荷下的薄弱环节。

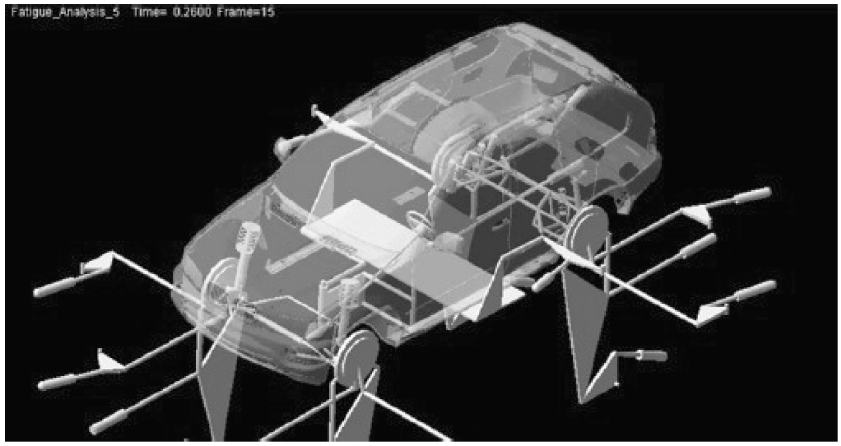


图 16-10　整车疲劳仿真（来自：宝马）

2. 材料老化

对冶金和化学过程的数值模拟方法，是现今的一个重要研究热点，如老化或腐蚀；然

而，除了对塑料材料模型的衰老过程和光照模拟试验，这些模拟仿真方法现今很少被运用到专业的汽车开发中。

3. 嵌入式软件

嵌入式软件程序支撑与控制硬件环境的仿真，是一种早期软件测试的通用方法。下述两种不同层次的仿真必须进行区分（比较 6.6 节）。

1）在硬件环路（HIL）仿真中，创建 ECU 输入信号的传感器和 ECU 控制执行机构都会进行仿真测试。这种仿真代表嵌入式系统的界面。

2）在软件环路（SIL）仿真中，不仅需要对相关的传感器和执行机构进行仿真测试，还需对 ECU 硬件进行仿真测试。在电子控制单元实际使用之前，这种方法被用来评估软件。

16.4.3　整车可靠性试验

1. 疲劳强度

一般来说，机械部件的工作强度是通过耐久试验来验证的。然而此处主要的重点在于车身、动力传动系统和底盘，事实上，任何部件都需主动或者被动地经历持续的运行试验来检验所规定的可靠性。比如，门在试验时需开关 10000 次。

将实车试验时所记录的载荷模式作为仿真时的输入数据进行加载，这也被用于动态整车试验装置中。高速液压伺服阀控制多个液压执行机构，使之能真实地重现记录的负载数据。在开发中心试验台上，被测车辆能在设计载荷谱的作用下，模拟高速试车环道、越野驾驶、乡村公路行驶等。图 16-11 显示了车辆在动态试验台上进行疲劳试验。

除了验证所需的工作强度，可靠性测试还必须验证由异常压力或不正确使用车辆所引起的损坏，如驶过坑槽路面或鹅卵石路面（图 16-12）。

图 16-11　整车疲劳测试装置（来自：宝马）

图 16-12　汽车驶过鹅卵石路面

2. 嵌入式软件测试

作为软件设计流程的一部分，在程序代码的前期测试后，要对嵌入式系统进行可靠性的功能性测试。硬件的最终测试希望能显示出预期的性能和有关假设，软件测试则用来寻找和修补尽可能多的漏洞。图 16-4 显示了在接近最终寿命的老化阶段，汽车电子失效概率的大体减少量。它还显示了经过软件功能更新后，失效概率有所反弹。

因为测试所有可能的输入组合是不可行的，故为检测必要的功能，指定测试情况而部署一个测试计划是非常重要的。为了全面地验证软件的可靠性，必须对这种测试计划进行评估。

3. 抗电磁干扰测试

正如上述讨论，抗电磁干扰是整车可靠性的一个重要方面。根据电磁兼容性（EMC）原则，完成传感器、执行机构、电子控制单元和安全带设计后，需测试整车的兼容性。抗干扰测试是按照 ISO/DIS 11451-2 标准以及 ISO 10605 标准有关车辆暴露在静电放电场合的有关规定，在消音室内将车辆暴露在有特定辐射干扰频谱条件下进行测试，测试方法按照或适用于企业标准。图 16-13 为用来进行整车测试的消音室。天线用于抗干扰测试及辐射测试（见 15.5 节）。

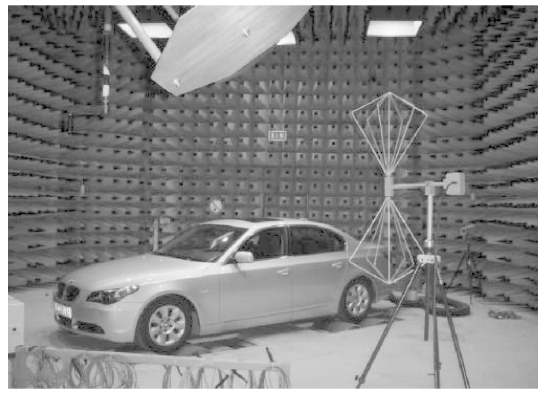


图 16-13　检测整车电磁兼容性的消音室

16.4.4　非营利机构评估

汽车被动安全和防盗可靠性是顾客在展厅或试驾过程中无法直接体验的一个整车特性，为了确保客户考虑购买的车辆能满足他们在可靠性方面的需求，他们都会寻求由独立机构出具的可靠性评估结果（比较 7.5.3 节）。例如，J. D. Power 机构的车辆可靠性研究（VDS），根据对拥有三年所有权的车主在过去 12 个月里所经历的故障率来评估车辆的质量。全德汽车俱乐部（ADAC）的年度故障统计数据是基于对每 1000 辆注册时间在 1～5 年内的车辆故障次数的统计所做出的普遍车辆评估。

2017 年 9 月 20 日，J. D. Power 在上海发布了 2017 中国车辆可靠性研究（VDS），如图 16-14 所示。该项研究发现，中国车主反映最多的汽车可靠性问题集中在车身外观和内装方面，两者分别占被访车主反映问题总数的 18% 和 15%。

中国车主反映最多的前三大车身外观问题为胎噪声过大、风噪声过大、车外灯灯泡损坏；反映最多的前三大汽车内装问题则是：转向盘过度磨损和褪色、内装材质容易弄脏或磨损、控制按钮标签褪色或被磨掉。

研究还发现，中国车主对车内气味敏感，气

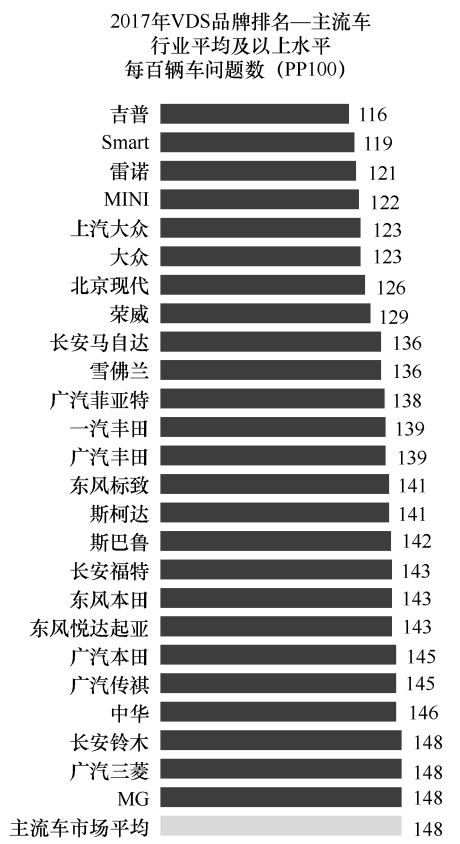


图 16-14　2017 中国车辆可靠性研究（VDS）

味问题在受访车主反映的所有问题中排列第四，且豪华车车主对此更为敏感。“出风口送出的风有令人不舒服的异味”是豪华车车主反映最多的问题，高达 4.4 个 PP100（每百辆车问题数）。

J. D. Power 中国区汽车产品事业部总经理蔡明指出：“厂商需要认识到，不同市场的消费者需求和顾虑可能会有很大差异，因此需要深刻洞察和准确把握不同市场消费者的特殊需求。例如，中国消费者明显更在意感官层面的直接感受，如声音、气味、空调温度、触感，而我们在美国的同类研究发现，美国消费者由于拥有更为丰富的购车和驾驶经验，通常会更关注技术层面相关的问题。”

该研究的其他发现：

中美消费者反映的车辆可靠性问题迥异：两国消费者反映最多的十个问题中仅有两个重合。中国消费者反映最多的问题与车身外观相关，而美国消费者反映最多的是音响系统/内置语音识别系统/内置免提通信设备/导航系统（ACEN），该问题占美国消费者反映的全部问题的 22%，但在中国只占 8%。

自主品牌和国际品牌的差距依然存在：2017 年，自主品牌和国际品牌之间的车辆可靠性差距为 30 个 PP100，与 2016 年的 28 个 PP100 基本持平。从 2010 年至 2017 年，两者间的差距从 201 个 PP100 已锐减到 30 个 PP100。

发动机和变速系统依旧是自主品牌与国际品牌的最大差距：这与之前数年的研究发现一致。在手动变速系统不易入档及齿轮摩擦这一问题上，自主品牌比国际品牌高 1.8 个 PP100。

参 考 文 献

[1] 洪永福. 汽车研发管理 [M]. 北京：机械工业出版社，2014.

[2] Weber J. Automotive Development Processes-Processes for Successful Customer Oriented Vehicle Development [M]. New York：Springer Press，2010.

[3] Negele H，Schmidt R，Finkel S，et al. Lessons learned from synchronizing complex systems development within automotive industry. Proceedings of INCOSE symposium. 8-14 July [C]. Orlando (FL)：Springer，2006.

[4] 赵福全，刘宗巍，李赞. 汽车产品平台化模块化开发模式与实施策略 [J]. 汽车技术，2017 (6)：1-6.

[5] Sörensen D. The automotive development process [D]. Wiesbaden：Deutscher Universitäts -Verlag，2006.

[6] 罗伯特 G 库珀. 新产品开发流程管理 [M]. 青铜器软件公司，译. 北京：机械工业出版社，2003.

[7] 洪永福. 汽车总体设计 [M]. 北京：机械工业出版社，2015.

[8] 唐杰，杨沿平，童一帆. 概念汽车开发 [M]. 北京：机械工业出版社，2010.

[9] Weber J，Fadel G. Opportunities and Hindrances to collaborative automotive development [J]. SAE Transactions，2007，115 (5)：911-920.

[10] Braess H H，Seiffert U. Handbook of Automotive Engineering [M]. Warrendale (PA)：SAE International，2005.

[11] ISO 9001. Quality Management Systems. Requirements [EB/OL]. (2015-03-25) [2017-10-26]. https：//www. iso. org/ iso-9001-quality-management. html，2015.

[12] ISO/TS 16949. Quality management systems. Particular requirements for the application of ISO 9001：2015 for automotive production and relevant service part organizations [EB/OL]. (2015-09-25) [2017-10-26]. www. iso. org/standard/ /52844. html ，2016.

[13] INCOSE. Systems engineering handbooks [EB/OL]. INCOSE，Seattle (WA)，2007. www. incose. org.

[14] CE4A. Welcome to CE4A-consumer electronics for automotive. [EB/OL]. (2014-01-01) [2017-10-26] https：//www. ce4a. de.

[15] USDOD. System Engineering Fundamentals [M]. Fort Belvoir (VI)：Defense Acquisition University Press，2001.

[16] IEEE. Guide to the software engineering body of knowledge [M]. Washington (DC)：IEEE，2004.

[17] 美国、欧洲、日本、中国汽车型式认证制度 [EB/OL]. (2015-09-25) [2017-10-26]. https：//wenku. baidu. com /view/ 62fdab705901020207409c94. html.

[18] 耿彤. 德国汽车理论 [M]. 北京：机械工业出版社，2012.

[19] Albano L D，Suh N P. Axiomatic design and concurrent engineering：Tools for product introduction [J]. Computer-Aided Design，1994，26：499-504.

[20] USDOT (2017) Federal motor vehicle safety standards and regulations [EB/OL]. (2015-09-25) [2017-10-26]. https：// icsw. nhtsa. gov/cars/rules /import/ FMVSS/.

[21] USDOT (2017) Compliance testing program [EB/OL]. (2015-09-25) [2017-10-26]. http：// www. dotcompliance consultants. com /regulation. html.

[22] Reed P (2017) . AAA Reveals The True Cost of Vehicle Ownership [EB/OL]. (2017-08-23) [2017-10-26] https：//www. theautochannel. com/news /2017/08/23/ 423589-aaa-reveals-true-cost-vehicle-ownership. html.

[23] T Litman. Transportation cost and benefit analysis [EB/OL]. Victoria Transport Policy Institute，2009. (2009-01-01) [2017-10-26] http：//mendeley. com.

[24] Michael Casillas. How much is it to add a new driver to your insurance on AAA AAA Driving Costs Brochure

[EB/OL]. (2009-01-01) [2017-10-26]. http://www.linkedin.com/pulse/how-much-add-new-driver-your-insurance-aaa-michael-Casillas.

[25] Lechner G, Naunheimer H. Automotive Transmissions: Fundamentals, S election, Design and Application [M]. Berlin : Springer Press, 2010.

[26] Milliken W F, Milliken D L. Chassis Design: Principles and Analysis [M]. Warrendale (PA): SAE International, 2002.

[27] Philip H. Objective Methods for the Assessment of Passenger Car Steering Quality [D/OL]. Bedfordshire: Cranfield University. http://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/8571, 2002.

[28] 徐大伟. 世界汽车安全性技术法规与标准的研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.

[29] 李海泓, 李紫惠. 汽车主动安全性及关键技术分析 [J]. 科技前沿, 2013 (08): 61-63.

[30] Yihanz. 如何测试评价汽车的主动安全性能? [EB/OL]. (2014-01-01) [2017-10-26]. https://www.zhihu.com/question/30362426.

[31] 中华人民共和国国家标准 [GB 7258—2012]. 机动车运行安全技术条件 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012: 1.

[32] 张小龙. 车辆主动安全性能道路试验系统及评价方法研究 [D]. 南京: 东南大学, 2006.

[33] 蔡华辉. 车载网络信息娱乐硬件系统的设计与实现 [D]. 厦门: 厦门大学, 2016.

[34] 陈朋. 车载防盗与信息娱乐系统设计 [D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2015.

[35] 环境保护部机动车排污监控中心. 新生产机动车环保达标排放申报指南 [尺]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010.

[36] 德拓管理咨询. 试验验证——汽车设计开发的一部分. 中汽技术信息, 微信公众号, 2016-4-15.

[37] Chris Adams. What is Ergonomics? [EB/OL]. (2014-01-01) [2017-10-26] https://www.thoughtco.com/what-is-ergonomics-1206379.

[38] 国际标准. ISO 9000-2015 质量管理体系基础和术语 (中文版) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015: 1.

[39] NASA. Fault tree handbook with aerospace applications. NASA office of safety and mission assurance [M]. Washington (DC): NASA Press, 2002.

[40] Standard: ISO 8402 Quality Management and Quality Assurance - Quality Vocabulary [D/OL]. (1997-5-01) [2017-10-26] http://segoldmine.ppi-int.com/content/standard-iso-8402-quality-management-and-quality-assurance-quality-vocabulary.

[41] 粟婷. 基于用户感知价值的汽车舒适性概念设计研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2016.

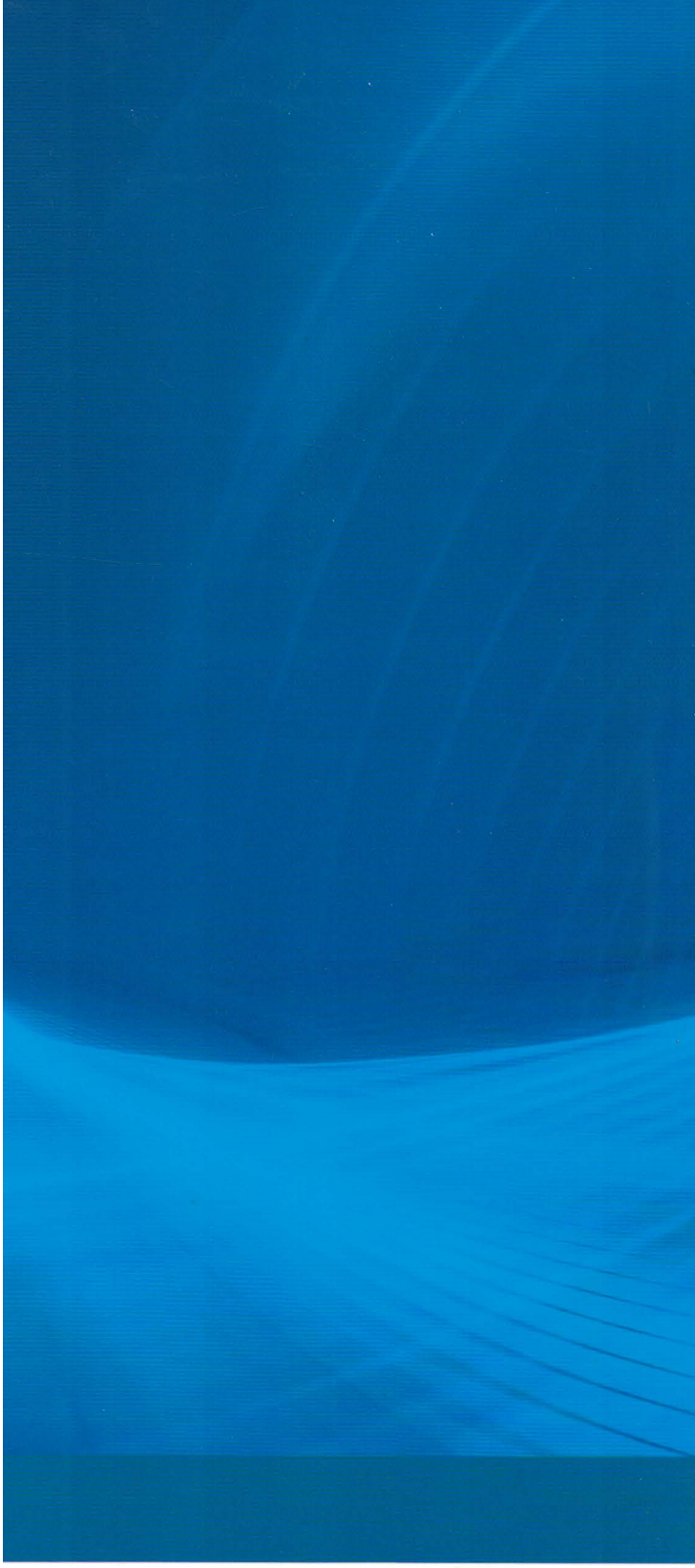
[42] 赵鑫. 汽车舒适性综合评价 [J]. 科技经济导刊, 2015, (6): 148-150, 68.

[43] Barkai J. Quality improvement and warranty cost containment [J]. SAE Transactions , 2004, 113: 392-396.

[44] IEEE 610.12. IEEE standard glossary of software engineering terminology, 1990.

[45] Pan J, Software reliability. Dependable Embedded Systems [D/OL]. Carnegie Mellon Univer-sity, 1999. (1999-11-01) [2008-11-20]. http://www.ece.cmu.edu/~koopman/des_s99/sw_reliability/index.html. Accessed 20 November 2008.

[46] Keiller P A, Miller D R. On the use and the performance of software reliability growth models [J]. Reliability Engineering & Systems Safety, 1991, 32: 95-117.



Automobile Design &
Development Integration

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
服务咨询热线：010-88379833
读者购书热线：010-88379649
网络服务
机工官网：www.cmpbook.com
机工官博：weibo.com/cmp1952
教育服务网：www.cmpedu.com
金书网：www.golden-book.com
封面无防伪标均为盗版

机工教育微信服务号

扫一扫，
更多精彩汽车
生活图书任你选

策划编辑◎丁锋 / 封面设计◎张静
ISBN 978-7-111-59916-6

ISBN 978-7-111-59916-6

定价：59.00元